



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Trabajo de Fin de Grado

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

MEMORIA

**RECURSOS DIDÁCTICOS PARA LA ENSEÑANZA Y
APRENDIZAJE DE LA ASIGNATURA “TEORÍA DE
MÁQUINAS Y MECANISMOS”: PROTOTIPOS
VIRTUALES Y REALES**

Autor:	Carlos Horas González
Director:	Enrique Ernesto Zayas Figueras
Convocatoria:	Abril 2019

Resumen

El presente Trabajo Final de Grado (TFG) tiene el objetivo de crear modelos virtuales tridimensionales y modelos físicos de mecanismos diversos y hacer la simulación de su funcionamiento, aportando de este modo recursos didácticos para la enseñanza y el aprendizaje de la asignatura Teoría de Máquinas y Mecanismos (TMM), la cual se imparte en el segundo año del Grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales (GETI) en la Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona (ETSEIB).

El trabajo propone y aplica, para los 7 mecanismos que han sido seleccionados en este TFG, un procedimiento para la creación de los modelos virtuales tridimensionales y de los modelos físicos, que comienza con la elección del mecanismo o artefacto real a modelar y culmina la obtención del modelo físico mediante impresión 3D con la técnica de Fabricación por Filamento Fundido (FFF). Dicho procedimiento consta de siete etapas que son las siguientes: elección del mecanismo o artefacto mecánico a modelar, caracterización del mecanismo, creación del modelo virtual tridimensional, esquematización del mecanismo, animación del mecanismo en tres dimensiones, análisis cinemático y por último la creación del modelo por impresión 3D. Se utiliza como herramienta para la modelación y simulación el software CAD SolidWorks y su módulo Motion. En la modelización de los mecanismos se propone y usa un código de colores para cada elemento del modelo virtual 3D creado, donde el color elegido para cada elemento pretende normalizar su identificación de forma que así se facilite a los alumnos la identificación de los elementos y la comprensión de la estructura y del funcionamiento del mecanismo. En el proyecto se aportan los esquemas de símbolos de los mecanismos analizados, creados utilizando el software Adobe Illustrator, en ellos se indican las coordenadas de posición y orientación consideradas más relevantes, así como los parámetros geométricos que definen su geometría y funcionamiento.

Es importante destacar el uso del módulo Motion de SolidWorks, que permite realizar la animación del funcionamiento, el análisis cinemático -aportando los gráficos deseados- y la renderización de los vídeos del mecanismo. A partir de la comprobación del funcionamiento correcto mediante la animación del mecanismo, se genera y guarda el video de su funcionamiento en vista bidimensional y tridimensional, recurso que facilita el estudio del mecanismo.

En este trabajo, se aportan como recursos didácticos para la enseñanza y el aprendizaje de la materia Teoría de Máquinas y Mecanismo, los modelos o prototipos virtuales tridimensionales de siete mecanismos y los vídeos que muestran su funcionamiento. Además, se aporta el modelo físico de un mecanismo de retorno rápido fabricado por impresión 3D, mediante la tecnología de fabricación por filamento fundido.

Sumario

1.	Prefacio	6
1.1.	Origen del proyecto	7
1.2.	Motivación	7
2.	Introducción	8
2.1.	Objetivos del proyecto	8
2.1.1.	Objetivos específicos.....	8
2.2.	Alcance del proyecto.....	9
3.	Estado del arte: recursos virtuales para la enseñanza.....	10
4.	Procedimiento de selección y modelación de máquinas y mecanismos	14
4.1.	Criterios para la selección de la máquina o mecanismo a estudiar.....	16
4.2.	Creación del modelo virtual en 3D.....	17
4.2.1.	Modelación de elementos mecánicos de geometría compleja	17
4.2.1.1.	Engranajes	17
4.2.1.2.	Relación de transmisión en el ensamblaje de engranajes	20
4.2.1.3.	Muelle	21
4.2.2.	Código de colores para identificación de tipos de elementos	23
4.3.	Creación de la animación del modelo virtual 3D mediante SolidWorks Motion.....	25
4.4.	Análisis cinemático mediante SolidWorks Motion	29
4.5.	Creación del modelo por impresión 3D	31
5.	Mecanismos elegidos para la Modelación y Simulación.....	33
5.1.	Mecanismos presentes en máquinas o artefactos comunes.....	33
5.1.1.	Mecanismo de descarga de una cisterna de baño.....	33
5.1.2.	Báscula Postal Mecánica (Pesa Cartas)	39
5.1.3.	Juguete Robot Andador	44
5.2.	Mecanismos de estructura compleja.....	51
5.2.1.	Mecanismo de retorno rápido de Whitworth.....	51
5.2.2.	Máquina de vapor de Watt	56
5.2.3.	Maqueta de Motor Stirling.....	62
5.2.4.	Mecanismo de distribución de Stephenson.....	69
6.	Mecanismo fabricado por impresión 3D.....	75
7.	Costes del proyecto.....	78
7.1.	Tipos de gastos.....	78
7.1.1.	Coste de personal.....	78

7.1.2.	Coste de material.....	79
7.2.	Resumen de costes.....	80
8.	Conclusiones.....	81
9.	Agradecimientos.....	83
10.	Bibliografía.....	84
10.1.	Referencias bibliográficas.....	84
10.2.	Otras Referencias	85
11.	Anexos: planos para la fabricación por carpintería.....	86

1. Prefacio

Según la experiencia personal del autor del proyecto y de muchos de sus compañeros de carrera, una de las principales limitaciones en el aprendizaje al enfrentarse a una nueva asignatura, es el tipo de recursos didácticos disponibles en la misma o la falta de éstos. Teniendo unos mejores recursos para el alumnado, no solo éste tiene más opciones de entender los contenidos, aprender y en consecuencia aprobar la asignatura en cuestión, sino que además es más probable que el estudiante obtenga más provecho del contenido del curso y de su auto preparación como ingeniero. El objetivo de este proyecto es aportar recursos didácticos para la enseñanza y el aprendizaje de la asignatura “Teoría de máquinas y mecanismos” (TMM), en particular aportar modelos virtuales y reales de artefactos mecánicos, para facilitar la comprensión y el aprendizaje de los conocimientos que se imparten en el programa docente de dicha asignatura y también ayudar a enriquecer su “cultura mecánica”.

El presente trabajo, entra dentro del tema de investigación “Aportación de recursos para la enseñanza y el aprendizaje de la materia Teoría de Máquinas y Mecanismos” que investiga el profesor Enrique E. Zayas Figueras, tema en el cual se ha desarrollado un proyecto final de grado previo de título “Recursos virtuales de apoyo a la enseñanza y aprendizaje de Teoría de Máquinas y Mecanismos” [1]. Este trabajo constituye un aporte a esta línea de trabajo y se puede entender como continuidad del proyecto antes citado, destacando a diferencia del mismo, la propuesta y utilización de una nueva metodología de trabajo para la creación de modelos virtuales y la utilización del módulo Motion de SolidWorks en el análisis cinemático de los mecanismos, obteniendo los datos que han permitido generar los gráficos cinemáticos que relacionan las coordenadas de posición y orientación elegidas como fundamentales en los mecanismos analizados y que han permitido comprobar el correcto funcionamiento de los mecanismos modelados y simulados. El presente trabajo aporta además una maqueta física de un mecanismo de retorno rápido materializada mediante piezas fabricadas por impresión 3D y algunas en madera. El autor, a partir de los resultados del proyecto y del debate con su tutor, pretende que el alumnado que cursa TMM sea capaz de entender que lo que se estudia en dicha materia tiene una aplicación manifiesta en el mundo real y que de esta forma se consiga que su motivación crezca y con ello sus ganas de aprender y que, en definitiva, acaben teniendo una mejor formación profesional.

1.1. Origen del proyecto

La existencia del proyecto llegó a oídos del autor a través de un compañero de carrera. El autor se puso en contacto con el Departamento de Ingeniería Mecánica (DEM) de la ETSEIB, y en particular con el profesor Enrique Zayas Figueras, quien le explicó más en detalle en qué consistiría la propuesta del proyecto: hacer uso del programa SolidWorks para crear modelos virtuales de mecanismos reales que faciliten el estudio y el aprendizaje del alumnado de TMM. Sobre la marcha se decidió también añadir al proyecto la creación de una maqueta de uno de los mecanismos estudiados haciendo uso de una impresora 3D.

La idea fue bien recibida por el autor ya que aunaba dos intereses: por un lado, la posibilidad de contribuir a la formación de futuros graduados, facilitando herramientas de aprendizaje y, por otro lado, la oportunidad de explorar el ámbito del diseño 3D mediante el uso del programa SolidWorks más allá de lo que se imparte en la propia carrera.

1.2. Motivación

La motivación para realizar este proyecto es prácticamente la misma tanto para el profesor como en el alumno. El profesor y director del trabajo, Enrique Zayas Figueras, siempre ha tenido el deseo de tratar de que sus alumnos saquen el máximo provecho y conocimiento de las asignaturas que él imparte en la medida que le sea posible. A su vez, el alumno y autor del trabajo, Carlos Horas González, conoce en primera instancia lo relevante que son los recursos en una asignatura para aprender lo máximo posible y tener una mejor formación como ingeniero. Así, este trabajo era una oportunidad para poder aportar a sus compañeros herramientas con las que se pudiera llegar a este fin de manera más sencilla y eficiente.

Una segunda intención del trabajo, en especial en referencia a la creación de un mecanismo con impresión 3D, es la de hacer entender al estudiante que aquello que se imparte en la universidad, y más concretamente en la asignatura de Teoría de Máquinas y Mecanismos, tiene aplicación manifiesta en el mundo real.

2. Introducción

2.1. Objetivos del proyecto

El objetivo principal del presente proyecto es el de crear modelos tridimensionales virtuales y físicos por impresión 3D de mecanismos diversos y simular su funcionamiento como material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la materia Teoría de Máquinas y Mecanismos (TMM).

2.1.1. Objetivos específicos

A partir del objetivo principal del trabajo, se trazan una serie de objetivos específicos que garanticen alcanzar la meta del trabajo, éstos son:

- Realizar el estudio del Estado del Arte del uso de recursos virtuales en la enseñanza de las respectivas asignaturas homólogas a TMM en distintas universidades españolas.
- Fundamentar la elección de los mecanismos a modelar y simular. Realizar una descripción del funcionamiento de los mecanismos elegidos y explicar los criterios que se han tenido en cuenta en la elección de los mismos.
- Caracterizar y analizar los mecanismos y máquinas escogidos para modelar y simularlos con el software de modelaje 3D SolidWorks.
- Crear modelos virtuales en 3D de los mecanismos y simular su funcionamiento mediante el módulo SolidWorks Motion. Generar los videos del funcionamiento de dichos mecanismos.
- En el caso de un mecanismo en concreto, crear también el modelo por impresión 3D mediante la técnica de deposición por filamento fundido.
- Extraer conclusiones de los resultados obtenidos en el proyecto.

2.2. Alcance del proyecto

Este trabajo final de grado (TFG) abarca las etapas de: elección de los artefactos a modelar, generación de los modelos virtuales tridimensionales mediante el programa SolidWorks (SW), generación de la animación del funcionamiento de los modelos tridimensionales y de los videos que permitan disponer de ello mediante el módulo Motion de SW. El TFG abarca también la realización de los esquemas de símbolos de los mecanismos mediante el uso del Adobe Illustrator y también el análisis cinemático de los mecanismos elegidos con el uso de Motion, así como la creación de gráficos cinemáticos que permitan comprobar el correcto funcionamiento de los mecanismos simulados. Además, el TFG incluye la materialización mediante fabricación por impresión 3D de un modelo físico del Mecanismo de Retorno Rápido. No está dentro del alcance del proyecto, la realización del análisis dinámico de los mecanismos elegidos.

El proyecto se divide en las siguientes etapas: selección de los artefactos a estudiar, modelación en 3D, esquematización, animación en 3D, creación de gráficos cinemáticos y fabricación con impresora 3D, en este orden.

3. Estado del arte: recursos virtuales para la enseñanza

Desde principio de siglo, la tecnología, y especialmente internet, ha avanzado exponencialmente. La forma en la que se obtiene información hoy en día a través de la red dista mucho de cómo se hacía 40 años atrás, cuando las fuentes eran casi exclusivamente manuscritas. Esta evolución ha permitido el desarrollo de herramientas virtuales que facilitan la transmisión de conocimientos, y en la educación ha tenido un impacto notable. Hoy en día prácticamente cualquier universidad cuenta con una plataforma virtual en la que hay una interacción entre alumno y profesor, así como una serie de apuntes, libros, exámenes, etc., todo ellos en formato digital disponibles y accesibles para que el estudiante complemente de forma autónoma la información impartida en clase. En algunos ámbitos docentes como la medicina o la ingeniería la disposición de recursos virtuales es esencial para la formación del alumnado ya que se tratan conceptos que necesitan de un soporte virtual tridimensional para llegar a alcanzar su completo entendimiento.

A continuación, se mencionan y muestran ejemplos de los campus virtuales que algunas universidades o instituciones utilizan para facilitar el intercambio de conocimientos dentro del campo de la Teoría de Máquinas y Mecanismos. Entre ellos están:

- La Universidad Politécnica de Valencia (UPV) cuenta con un espacio en la red que contiene mucha información complementaria al temario dado en clase. Se utiliza un software llamado Cosmos Motion (Figura 3.1) para simular el funcionamiento de diversos mecanismos en 3D. Este software trabaja dentro de la ventana de SolidWorks y utiliza la información de un ensamblaje existente para generar estudios de simulación de movimiento. [2]

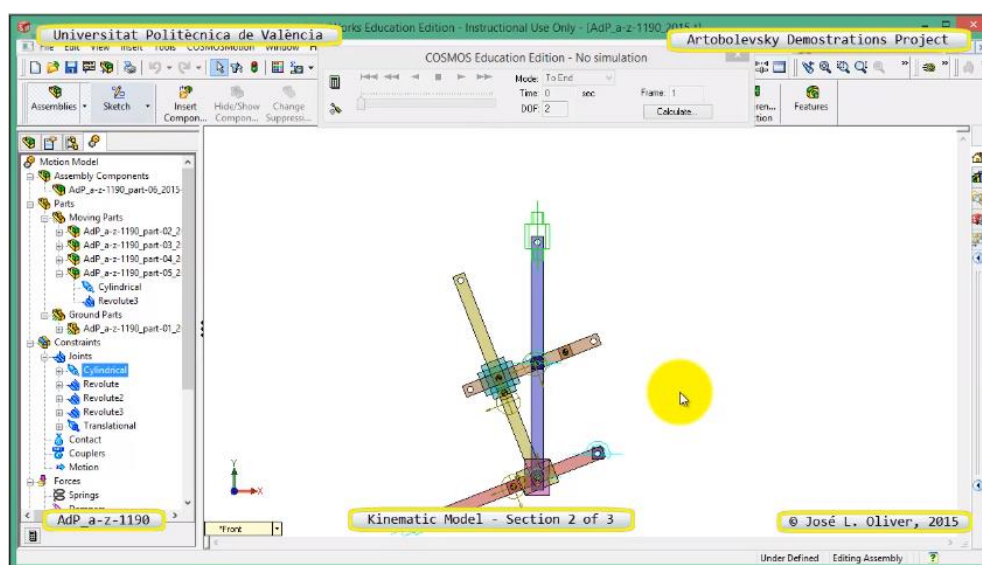


Figura 3.1 Pantalla del programa CosmosMotion en el que aparece un mecanismo de barras bidimensional

- La Universidad Carlos III de Madrid también cuenta con una plataforma llamada OpenCourseWare (la publicación de materiales docentes como "contenidos abiertos") en la que se permite el acceso a diversos vídeos que muestran mecanismos en funcionamiento, como por ejemplo mecanismos de barras, un motor de combustión interna (Figura 3.2), un motor Stirling entre otros. [3]

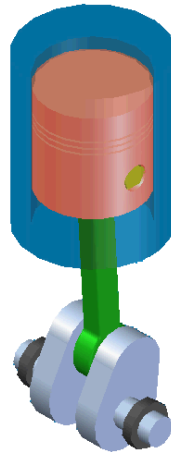


Figura 3.2 Imagen tomada de la animación del mecanismo de manivela-biela-pistón tomado de la OpenCourseWare de la UC3M.

- En el Moodle del área de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Málaga se utiliza el software WinMecC (Figura 3.3). Este es un programa de simulación de mecanismos de barra planos con un grado de libertad. Con esta herramienta se puede realizar el análisis cinemático y dinámico de mecanismos planos. [4]

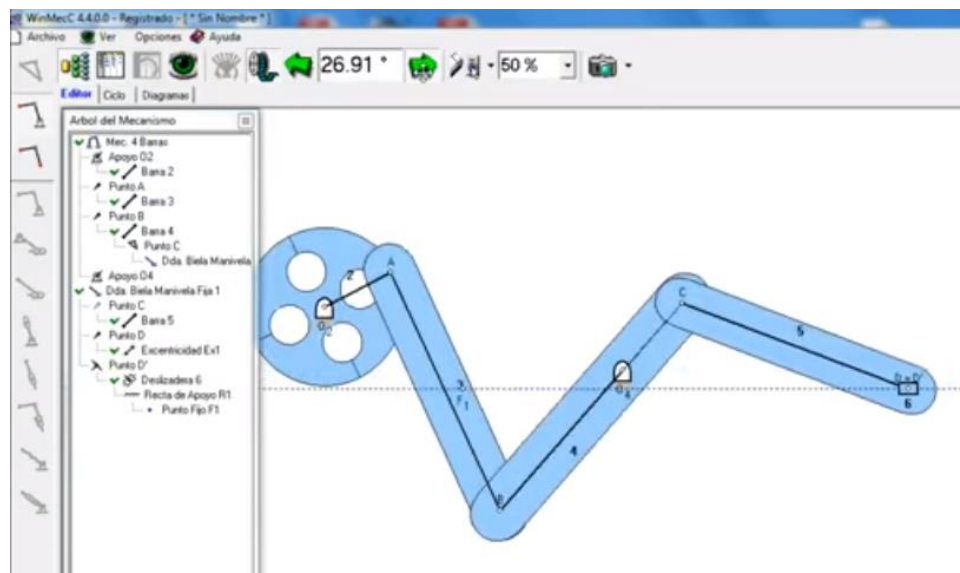


Figura 3.3 Ejemplo de la interfaz del programa WinMecC. Simulación de un mecanismo de barras.

- En Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), en particular en la ETSEIB se ha creado y utiliza el Programa de Análisis de Mecanismos (PAM) [5] para la modelación y simulación de mecanismos planos de barras que puede ser accionados por transmisiones dentadas, de poleas y correas o transmisiones de cadenas (Figura 3.4). En las clases de TMM se utilizan animaciones de mecanismos en 2D creadas con dicho programa y también animaciones 2D creados con otro programa denominado GeoGebra [6]. En la Figura 3.5 se muestra una captura de pantalla de la simulación del funcionamiento de un mecanismo de leva de excéntrica con doble palpador plano de translación creado con GeoGebra.

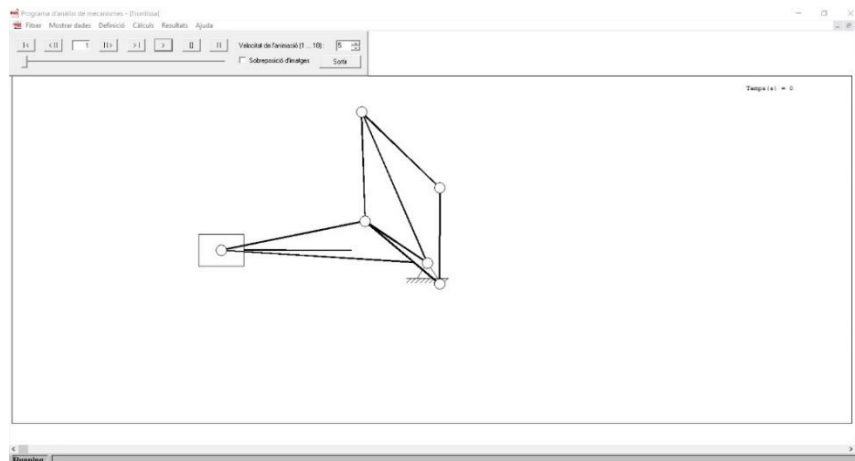


Figura 3.4 Captura de pantalla del programa PAM. Modelo de un mecanismo barras c correspondiente a una bisagra.

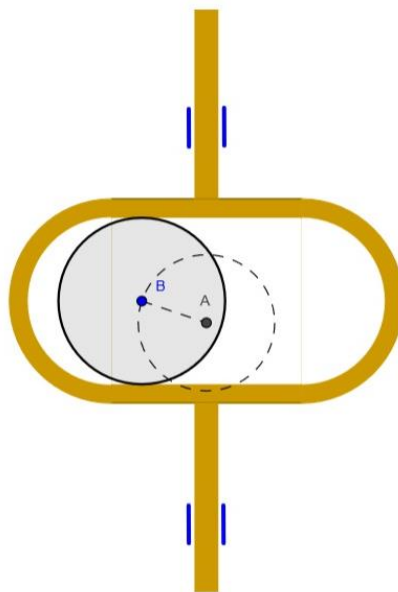


Figura 3.5 Captura de pantalla del mecanismo de leva de excéntrica con doble palpador plano de translación creado con el programa GeoGebra.

- Otra plataforma que no pertenece a ninguna universidad es GrabCAD, librería donde se puede acceder e intercambiar sistemas mecánicos diseñados con programas CAD (*Computer-Aided Design*), dentro de la que se pueden encontrar gran variedad de mecanismos diseñados y compartidos entre la comunidad de usuarios. GrabCAD, Inc. es una “startup” con sede en Cambridge, Massachusetts, que creó un entorno de colaboración gratuito basado en la nube que ayuda a los equipos de ingeniería a gestionar, ver y compartir archivos CAD. En ésta usuarios de todo el mundo pueden colgar sus diseños realizados en programas CAD para que otros puedan visualizarlos y descargarlos. Esta plataforma también ofrece tutoriales para diferentes programas de modelación y diseño 3D. En la Figura 3.6 se muestra el ejemplo de un modelo virtual en 3D de un mecanismo de manivela-biela-pistón tomado de la librería GrabCAD. [7]

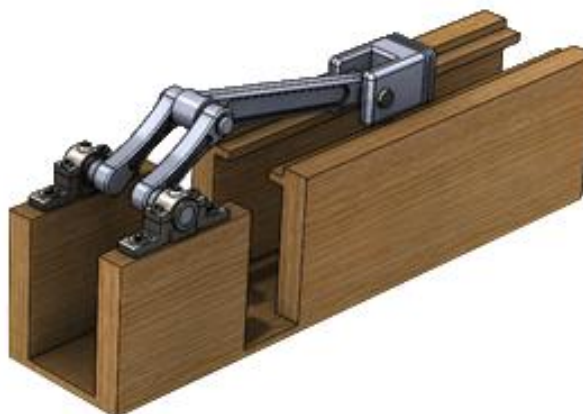


Figura 3.6 Ejemplo de modelo virtual en 3D de un mecanismo de manivela-biela-pistón recogido en la librería GrabCAD.

En el presente trabajo se utilizan herramientas informáticas actuales, como el software SolidWorks y Adobe Illustrator, con la finalidad de crear y aportar recursos virtuales al estudiantado de TMM, para contribuir a su proceso de autoaprendizaje. Se modelan distintas máquinas y mecanismos y se crean a sus respectivos esquemas de símbolos de forma que puedan asociarse y entenderse con facilidad. También se renderiza un vídeo para cada mecanismo analizado con el cual los estudiantes podrán discernir qué función ejecuta cada pieza que forma el mecanismo y como se ensamblan entre ellas. En definitiva, la intención es acercar, de una forma práctica, al alumno a la ingeniería mecánica que se encontrará más adelante.

4. Procedimiento de selección y modelación de máquinas y mecanismos

Seguidamente se presenta el diagrama de flujo que plasma el procedimiento seguido para cada uno de los mecanismos estudiados en el presente proyecto, en referencia a su selección, modelación, etc. El procedimiento consta de diversas etapas y subetapas, y tiene como final la creación del video que muestra la simulación del mecanismo en cuestión. Cabe destacar que cada una de las etapas se realizó de forma transversal en cada uno de los 7 mecanismos que forman este proyecto, y no se pasaba a la siguiente etapa a menos que todos los mecanismos la hubiesen “superado”.

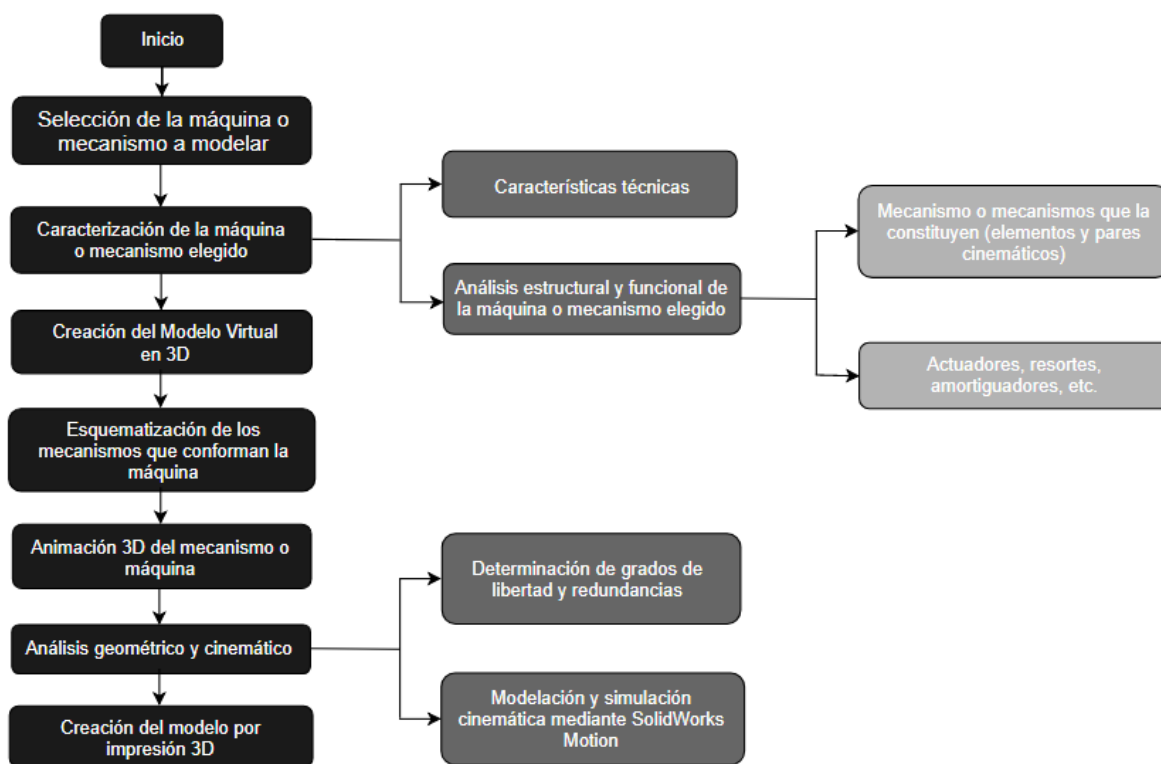


Figura 4.1 Procedimiento para la selección, modelación, simulación y creación del modelo físico de las máquinas y mecanismo expuestos en el trabajo.

Más concretamente, la descripción del trabajo realizado en cada etapa es la siguiente:

- **Selección de la máquina o mecanismo:** se han establecido unos criterios detallados en el apartado 4.1 con los que se explica qué mecanismos han sido considerados más interesantes o pertinentes de cara al autoaprendizaje del alumnado de TMM.

- **Caracterización de la máquina o mecanismo elegido:** se estudian las características técnicas y se realiza un análisis estructural (para identificar los elementos y enlaces que lo forman), la geometría de los elementos, las dimensiones de los mismos, el número de dientes y el diámetro exterior en caso de ruedas dentadas, el diámetro de las excéntricas y volantes de inercia, las longitudes y el número de espira de los resortes, etc. También se realiza el análisis funcional de la máquina o mecanismo. Se toman las medidas de la maqueta física mediante el uso de instrumentos de medición como pie de rey, regla metálica y transportador de ángulos.
- **Creación del modelo virtual en 3D:** se utiliza el software CAD SolidWorks para obtener el modelo virtual 3D de cada elemento del mecanismo, y así mediante el ensamblaje posterior de dichos elementos se reproduce virtualmente el modelo de la maqueta del mecanismo o máquina elegido. Una vez creado el modelo virtual, se generan la vista de alzado y una vista tridimensional.
- **Esquemmatización de los mecanismos que conforman la máquina:** se realiza el esquema de símbolos, primero sobre la vista en alzado del mecanismo que permite identificar y situar los símbolos de elementos como correderas, barras, articulaciones, guías, pasadores, etc. justo sobre los elementos reales del mecanismo, todo ello mediante el uso de la simbología normalizada y estudiada en las clases de TMM. Posteriormente, se extrae el esquema de símbolos y se sitúa sobre el plano y se completa añadiendo los parámetros geométricos como distancias o ángulo y las coordenadas de posición y orientación de los elementos.
- **Animación 3D del mecanismo o máquina:** se utiliza el módulo Motion del programa SolidWorks, estableciendo inicialmente un análisis sencillo de movimiento o animación. Una vez comprobado que el funcionamiento del mecanismo es el adecuado, se realiza un video con extensión .avi en el que se muestre el mecanismo o máquina en cuestión en funcionamiento.
- **Análisis geométrico y cinemático:** A partir de las variables establecidas en el esquema de símbolos y eligiendo aquellas que se consideran más importantes en el funcionamiento del mecanismo, como son las variables de entrada (elemento motriz del mecanismo) y de salida del movimiento, se elaboran gráficos cinemáticos que permiten explicar la relación entre dichas variables y comprobar que los valores obtenidos coinciden con los reales del mecanismo analizado. En este paso, también se añade el análisis de los grados de libertad y del número de redundancias posibles en el mecanismo.

- **Creación del modelo por impresión 3D.** Constituye el último paso del procedimiento propuesto y tiene por objetivo materializar el mecanismo modelado y simulado. En este proyecto se ha elegido el mecanismo de retorno rápido para ser materializado. Sí se fabrica una maqueta física real a partir del método de impresión 3D por Fabricación por Filamento Fundido (FFF). Ello implica, tener en cuenta en el modelo virtual de cada elemento, aspectos de diseño a considerar en piezas a fabricar por el método antes citado.

A continuación, se explica más detalladamente alguna de las etapas en aras de clarificar su desarrollo.

4.1. Criterios para la selección de la máquina o mecanismo a estudiar

Los mecanismos o máquinas presentes en el proyecto se dividen en dos grandes grupos, según el criterio para su elección:

- Mecanismos presentes en máquinas o artefactos comunes, de estructura relativamente simple. En este grupo se han enmarcado tres mecanismos: a) **Mecanismo de descarga de cisterna**, b) **Báscula Postal Antigua** -también denominada Pesa cartas- y c) **Juguete Robot andador**. Al ser artefactos presentes en la vida cotidiana, se pretende fomentar el acercamiento entre conocimiento impartido en la materia TMM y su aplicación práctica. Esta idea es de vital importancia ya que invita a que el estudiante analice más en profundidad su entorno y que por ejemplo se plantee cómo funciona la cisterna del baño, el pomo de una puerta, un aspersor, etc.
- Máquinas y mecanismos de estructura compleja que incluyen diversos elementos como volantes, excéntricas combinadas con bielas, engranajes, etc. A este grupo de mecanismos estructural y funcionalmente más complejos pertenecen: a) la **máquina de vapor de Watt**, b) **el motor Stirling**, c) **el mecanismo de distribución de Stephenson** y d) **el mecanismo de retorno rápido de Whitworth**. Con este segundo grupo se pretende enriquecer el conocimiento histórico-técnico del estudiante respecto de la ciencia de la teoría de máquinas y los mecanismos.

A excepción del mecanismo de descarga de cisterna, el resto de los mecanismos fueron propuestos por el director del proyecto.

4.2. Creación del modelo virtual en 3D

Una vez se ha analizado de manera detallada la estructura del mecanismo elegido (elementos y pares cinemáticos), se procede a crear el modelo 3D de cada elemento y posteriormente realizar el ensamblaje del mecanismo en SolidWorks. Esta etapa permite también verificar las dimensiones previamente tomadas en la maqueta original y comprobar el montaje y funcionamiento del modelo virtual del mecanismo.

El diseño de los elementos no es especialmente complejo a excepción de algunas piezas como pueden ser un muelle, una hélice, etc. La dificultad al crear los modelos 3D reside principalmente en el proceso de ensamblaje de todas las piezas, ya que se deben de tener en cuenta muchas relaciones de posición entre los elementos para garantizar el correcto funcionamiento del mecanismo.

Siguiendo el estilo del trabajo anterior de Daniel Merino Miró [1], se ha utilizado un código de colores para clasificar cada pieza del mecanismo, facilitando así la identificación de los elementos que constituyen la máquina o mecanismo.

4.2.1. Modelación de elementos mecánicos de geometría compleja

A continuación, se habla de la modelación de diversos elementos mecánicos utilizados en las máquinas o mecanismos de este proyecto y también de aspectos trascendentes relativos al ensamblaje de los elementos para formar el mecanismo. En particular se exponen los aspectos relativos a: engranajes, definición de la relación de transmisión al ensamblar engranajes y a la modelación de muelles.

4.2.1.1. Engranajes

La novedad en el diseño de los engranajes respecto al proyecto de Daniel [1], ha sido que en lugar de crear el engranaje “manualmente” a través de formas geométricas y extrusiones, en este proyecto se ha hecho a través del uso de la herramienta Toolbox (Caja de Herramientas) que ofrece SolidWorks. Toolbox es una librería (o base de datos) que incluye muchos componentes estándar, entre ellos se incluyen elementos como pueden ser: tornillos, pernos, arandelas, rodamientos, engranajes, levas... y muchas más opciones. Así, Toolbox permite diseñar de manera asistida y guiada engranajes y otras muchas piezas simplemente introduciendo en las cajas de diálogos los valores de parámetros correspondientes y deseados por el diseñador. En la Figura 4.2 se expone la secuencia a seguir para crear un engranaje con Toolbox.



Figura 4.2 Pasos a seguir utilizando Toolbox para crear un engranaje

Dentro de la opción de Toolbox se selecciona la carpeta “ISO”, que es la norma que se utiliza en el proyecto de acuerdo al Sistema Intencional de Unidades (Sistema Métrico). A continuación, se selecciona la carpeta “transmisión de potencia”, dentro de ésta se elige la carpeta “Engranajes” y por último se selecciona el tipo de engrane a diseñar (cilíndrico de dientes rectos o helicoidal, engranajes cónicos, cremallera, etc.), luego con el botón derecho del ratón se selecciona la opción de crear pieza, en nuestro caso en el “Engranaje recto” (Figura 4.3).

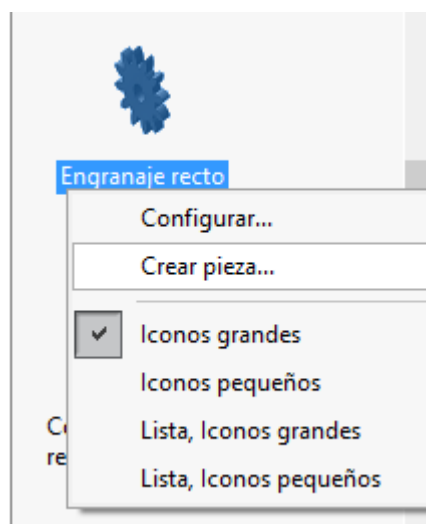
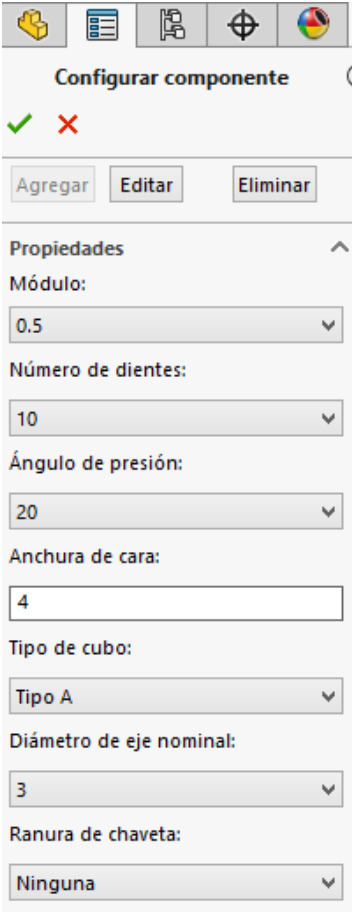


Figura 4.3 Creación del engranaje con Toolbox en SolidWorks

Al hacer esta selección se despliega un menú en el que se debe elegir entre diversas opciones para diseñar el engranaje (Figura 4.4).



The image shows a software interface for configuring a gear component. At the top, there is a toolbar with icons for selection, list, copy, zoom, and a color wheel. Below the toolbar is a title bar that says 'Configurar componente'. Underneath the title bar are two status indicators, a green checkmark and a red X. Below these are three buttons: 'Agregar', 'Editar', and 'Eliminar'. The main section is titled 'Propiedades' and contains several configuration options, each with a dropdown menu or a text input field. The options are: 'Módulo:' with a dropdown showing '0.5'; 'Número de dientes:' with a dropdown showing '10'; 'Ángulo de presión:' with a dropdown showing '20'; 'Anchura de cara:' with a text input field showing '4'; 'Tipo de cubo:' with a dropdown showing 'Tipo A'; 'Diámetro de eje nominal:' with a dropdown showing '3'; and 'Ranura de chaveta:' with a dropdown showing 'Ninguna'.

Figura 4.4 Menú para crear configurar el engranaje

Los datos que deben introducirse son:

- El **módulo** m : En este caso se lleva a cabo un proceso de ingeniería inversa; es decir, partiendo de un engranaje que ya existe en un mecanismo o máquina a modelar, se requiere encontrar el valor del módulo de dicho engranaje. Éste se obtiene a partir de la formula $d_{ext} = m * (z + 2)$ [8], donde d_{ext} es el diámetro exterior del engranaje que se mide utilizando un pie de rey, z es el número de dientes de la rueda y m es el módulo, que se determina despejándolo de dicha expresión. El valor de módulo encontrado se debe de normalizar, por ejemplo, utilizando una tabla de valores de módulos normalizados [8].
- **Número de dientes** z
- **Anchura de la cara** b : grosor del engranaje en mm (distancia de una cara a la otra).
- **Diámetro interior del cubo del engranaje**: diámetro interior del engranaje en mm por el que éste se une a su eje.

Al seleccionar estos datos, automáticamente se generará el engranaje deseado en la zona de trabajo de Solidworks. En la figura 4.5 se muestra un ejemplo de engranaje diseñado mediante el proceso antes explicado.

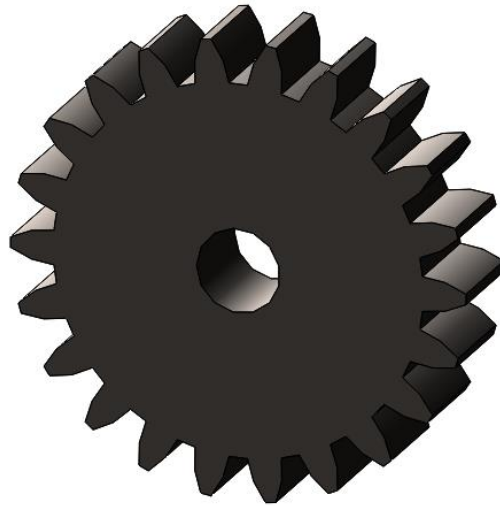


Figura 4.5 Modelo virtual tridimensional del engranaje diseñado con Toolbox

4.2.1.2. Relación de transmisión en el ensamblaje de engranajes

Para ensamblar entre sí los engranajes diseñados se ha de utilizar la relación de posición “Engranaje” (Figura 4.6), dentro del apartado “Relaciones de posición mecánicas”. En esa opción se debe de introducir la relación de transmisión entre engranajes; la forma más sencilla es introducir el número de dientes de ambas ruedas dentadas (piñón y rueda) y el programa calcula automáticamente cual es la relación de transmisión (valor que el diseñador conoce previamente a haber contado el número de dientes correspondiente a cada rueda). Previamente se establece una relación de tangencia entre dos dientes, uno de cada engranaje, para que el movimiento del mecanismo sea realista y no se solapen los dientes, sino que roten y deslicen entre sí; tras haber establecido la relación de posición mecánica se elimina esta condición de tangencia.



Figura 4.6 Menú para establecer la relación de posición de engranaje

4.2.1.3. Muelle

Para diseñar un muelle no son necesarias muchas operaciones, en primer lugar, en el plano alzado de SolidWorks se dibuja una línea vertical que desarrollará la función de eje del resorte y, en la parte inferior, a una distancia determinada de dicha línea (distancia equivalente al diámetro interior del resorte helicoidal), se croquiza una circunferencia que equivale al diámetro del alambre del resorte. Posteriormente se añade un plano horizontal paralelo a planta coincidente con el final de la generatriz. (Figura 4.7)

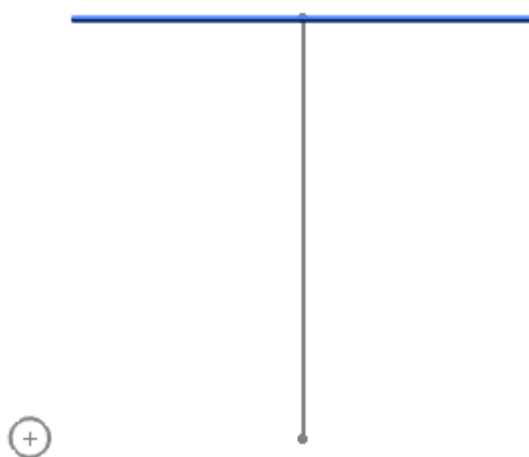


Figura 4.7 Croquis inicial para crear el muelle

Posteriormente se utiliza la herramienta “Barrer” (Figura 4.8) dentro de la pestaña

de operaciones de “Superficies”. En este menú se debe introducir el Croquis (circunferencia) y la Ruta (generatriz). También debe introducirse el número de revoluciones o vueltas que tiene que debe tener el muelle (esto equivale al número de espiras del mismo).

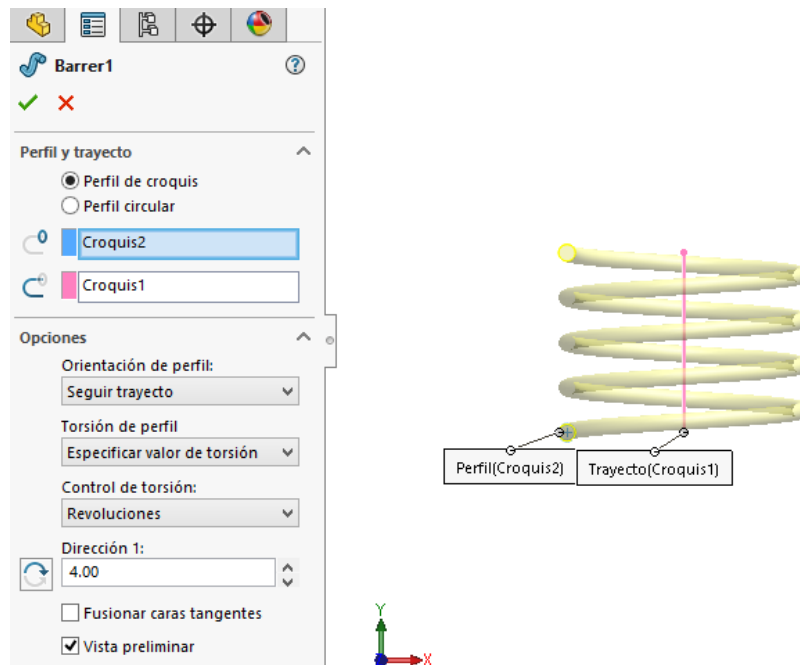


Figura 4.8 Menú de la operación “Barrer” para crear un resorte helicoidal

Finalmente, se emplea la operación “cortar con superficie” para aplanar los extremos del muelle (extremos por donde el muelle contacta con las piezas entre las que se coloca), utilizando el plano previamente creado y la planta como límites para seccionar el muelle. Así queda terminado el modelo del resorte, tal como se muestra en la Figura 4.9.

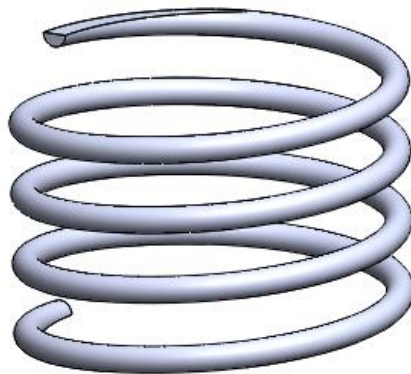


Figura 4.9 Modelo virtual tridimensional del muelle

4.2.2. Código de colores para identificación de tipos de elementos

El objetivo de establecer y utilizar un código de colores que asigna un color según el tipo de elemento que constituye un mecanismo o máquina es que los estudiantes de TMM puedan familiarizarse e identificar de manera más fácil y rápida a los diferentes elementos constituyentes. Partiendo de la propuesta inicial de código de colores realizada por Merino [1], en el presente trabajo se muestra en la Tabla 4.1 el código de colores enriquecido en el trabajo actual dada la utilización de nuevos elementos mecánicos -como por ejemplo la excéntrica y el volante de inercia. el color RGB utilizado y su nombre técnico.

Elemento	Color	Color técnico (Nomenclatura en inglés) [9],[10]	Modelo RGB		
			R	G	B
Biela	Naranja	<i>Vivid orange</i>	232	113	8
Manivela	Verde	<i>Pure lime green</i>	0	255	0
Balancín	Azul	<i>Pure blue</i>	0	0	255
Separador	Amarillo claro	<i>Very light yellow</i>	255	255	128
Palpador	Rojo	<i>Pure red</i>	255	0	0
Pistón	Azul claro	<i>Very light cyan</i>	128	255	255
Rueda pequeña (piñón)	Verde	<i>Strong lime green</i>	0	192	0
Corona dentada	Verde claro	<i>Very pale lime green</i>	192	255	192
Leva	Amarillo claro	<i>Very light yellow</i>	255	255	128
Rodillo	Azul verdoso	<i>Vivid cyan</i>	7	255	251
Planeta (engranaje)	Verde claro	<i>Very light lime green</i>	154	255	151
Elementos terminales	Granate	<i>Very dark red</i>	87	0	12
Rueda excéntrica	Rosa	<i>Pure pink</i>	255	0	165
Volante de inercia	Lila	<i>Very light violet</i>	214	127	255
Manivela con pares superiores	Amarillo	<i>Pure yellow</i>	255	245	0
Eje útil (Árbol)	Rojo	<i>Pure red</i>	255	0	0
Guía articulada	Morado	<i>Very light violet</i>	201	143	255

Tabla 4.1 Código de colores de identificación de los elementos mecánicos

4.3. Creación de la animación del modelo virtual 3D mediante SolidWorks Motion

Tras haber creado el prototipo virtual en 3D del mecanismo, se procede a la realización de un video con el mecanismo en funcionamiento. Esta animación tendrá una duración entorno a los 15 segundos (tiempo elegido por el autor, considerado suficiente para visualizar el funcionamiento del mecanismo) y comprende diferentes ángulos de forma que se pueda apreciar correctamente como trabajan y se enlazan entre ellos los elementos que forman el mecanismo. En el caso de alguno de los mecanismos también se elige hacer transparente alguna pieza durante unos segundos de manera que se pueda garantizar esta última premisa, es decir, ver los elementos interiores.

Se utiliza el complemento SolidWorks Motion para la realización de dichos videos. Este módulo permite visualizar como se mueve el conjunto de elementos ensamblados e incluso hacer mediciones y gráficos cinemáticos de variables del modelo que interesen. Motion da la opción de añadir motores, muelles, amortiguadores, fuerzas, contacto entre elementos e introducir el efecto de la aceleración de la gravedad en el ensamblaje que se quiere estudiar.

Este complemento permite trabajar con 3 opciones distintas: a) Animación, b) Movimiento Básico y c) Análisis de movimiento, las cuales están ordenadas de menos a más realista en relación a parámetros que se han de tener en cuenta para llevar a cabo la simulación. Para este apartado del proyecto se utiliza la opción “Animación”, que se define como “un movimiento conducido por puntos clave o motores, y restringido por relaciones de posición de ensamblaje” (SW); es decir que no entran en consideración aspectos como la inercia o la gravedad ya que no son necesarios para visualizar el funcionamiento de los mecanismos o el análisis de su cinemática.

El módulo Motion cuenta con muchas opciones (Figura 4.10); básicamente está formado por filas horizontales y una línea vertical desplazable; la primera fila es para el tiempo de simulación, la segunda para la orientación de la cámara, las filas siguientes son para cualquier motor, muelle, etc. que se hayan añadido al ensamble, y por último una fila para cada una de las piezas que conforman el ensamblaje. La línea vertical es la del tiempo que permite el desplazamiento por toda la simulación y cambiar parámetros de un instante en concreto, como por ejemplo la transparencia u opacidad de una pieza o el cambiar una pieza de posición.

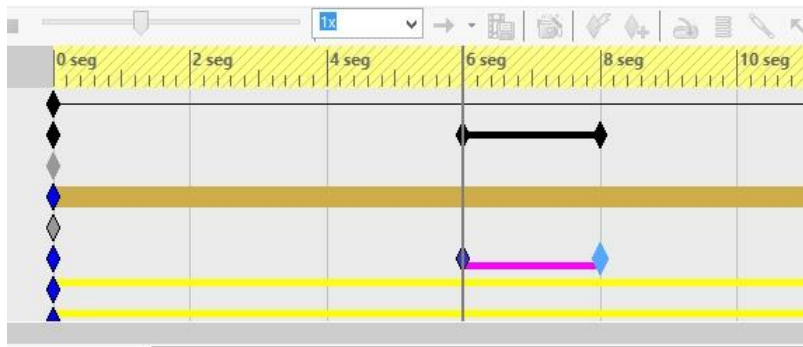


Figura 4.10 Display del módulo Motion

Para simular el funcionamiento de los mecanismos se aplica una fuerza vertical en el caso del mecanismo de la báscula postal y del mecanismo de la cisterna (como elementos que producen el movimiento de los mismos); en el caso de los 5 mecanismos restantes se aplica un motor rotatorio (actuador) con velocidad angular constante.

Para introducir un motor en el ensamblaje se selecciona la opción “Motor” (Figura 4.11) y se selecciona la cara en la que se aplicará el motor, el sentido de rotación del su eje (horario o antihorario), y las revoluciones por minuto a las que funcionará dicho motor. En el caso de los 5 mecanismos antes citados se ha escogido una velocidad entre 20 y 30 RPM; una velocidad razonable para que el ojo humano pueda apreciar el movimiento natural del mecanismo.

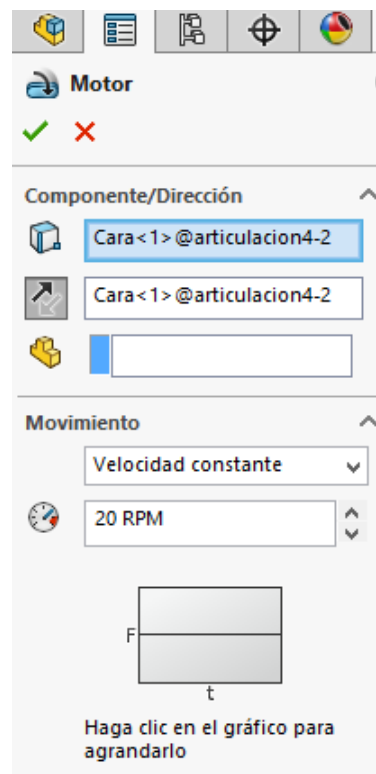


Figura 4.11 Menú para introducir los parámetros del Motor

Para aplicar una fuerza, se selecciona la opción “Forzar” (Figura 4.12) y se elige la cara en la que tiene que actuar y en qué dirección. Para el mecanismo de descarga de cisterna se utilizó una fuerza de 0,02 N sobre el tapón y para la báscula de correos 0,05 N sobre la base o bandeja en la que se deposita la carta cuyo peso se quiere determinar.

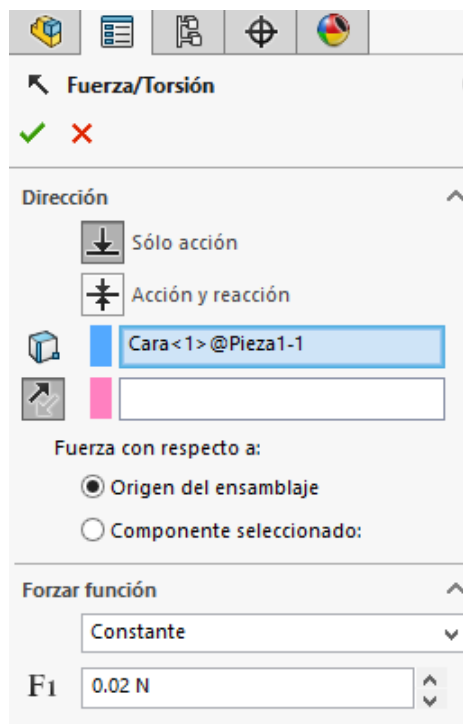


Figura 4.12 Menú para introducir la Fuerza o el Par correspondiente

Es preciso que durante la animación se vaya cambiando de punto de vista con la intención de poder apreciar correctamente qué movimiento tiene cada pieza implicada en el ensamble.

En el caso de mecanismos que contienen engranajes, hace falta ajustar en “Propiedades del estudio de movimiento” los *frames* por segundo de la animación para que la rotación de las ruedas dentadas y la forma en cómo engranan unas con otras sean lógicos y fluidos. En caso contrario la tasa de muestreo del software sería inferior a la determinada por el teorema de Nyquist-Shannon y se podría ver como la rueda dentada gira a la inversa. Se elige la opción de 50 *frames* por segundo (Figura 4.13).

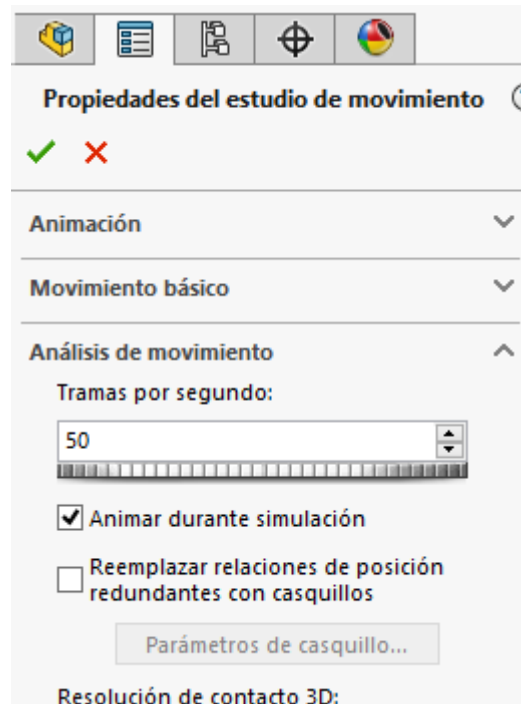


Figura 4.13 Menú en el que se introducen las propiedades del estudio del movimiento

Por último, solo resta renderizar la animación, para ello se escoge una resolución de alta definición 16:9 y de nuevo se escogen 50 *frames* por segundo. Se elige como formato de video el estándar .avi (Figura 4.14).

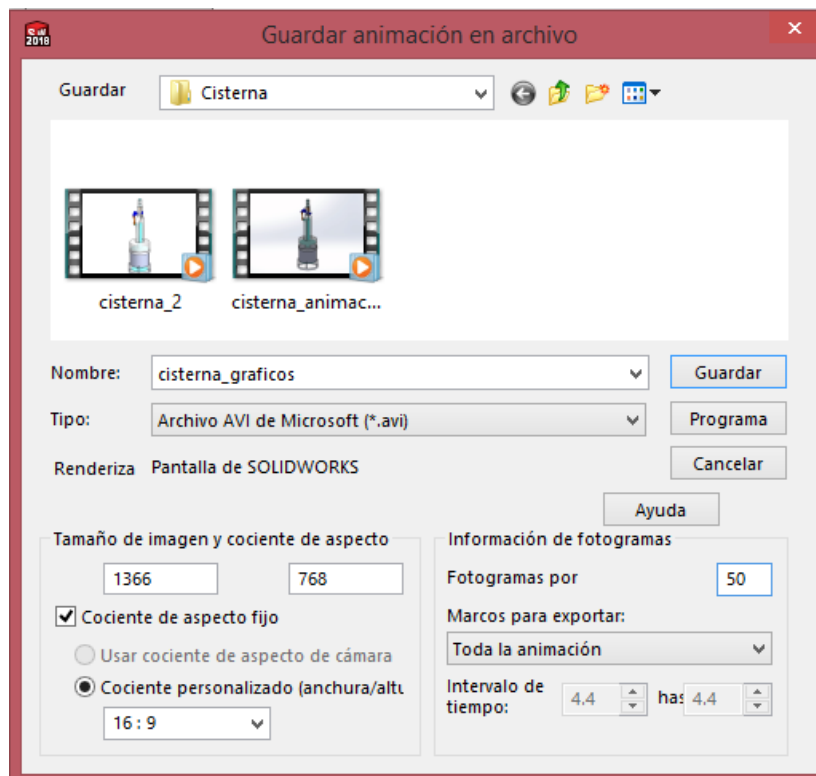


Figura 4.14 Menú para guardar el video de la simulación que contiene la animación del mecanismo

4.4. Análisis cinemático mediante SolidWorks Motion

Para poder extraer gráficos del funcionamiento de los mecanismos, primeramente, en el “Tipo de estudio” se tiene que seleccionar la opción “Análisis de movimiento”, que tiene por definición: “La simulación más realista, tiene en cuenta todos los tipos disponibles de objetos de movimiento y proporciona resultados numéricos precisos”. En algún caso es necesario suprimir alguna relación de posición y en su lugar añadir un contacto entre sólidos con la herramienta “Contacto”. Por último, se selecciona la opción de “Resultados y Trazados” y se seleccionan las magnitudes que han de aparecer en el gráfico (Figura 4.15). Para esclarecer esta operación se explica por pasos el ejemplo del mecanismo de Retorno Rápido, en el que interesa medir el desplazamiento horizontal (componente x) de la corredera en su guía. Los pasos a seguir son los siguientes:

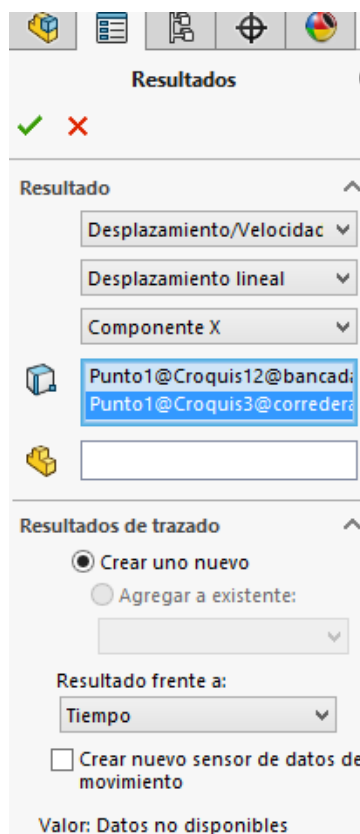


Figura 4.15 Menú para obtener los gráficos cinemáticos

- Dentro de la categoría a medir se selecciona la opción “Desplazamiento/Velocidad/Aceleración” (también se pueden medir fuerzas, momentos, si el análisis que se quiere hacer es dinámico).
- En la subcategoría se elige “Desplazamiento Lineal” (también se pueden medir velocidades lineales o angulares, aceleraciones, etc.).
- El componente en el que se desliza la corredera es el eje X, por lo tanto, se

selecciona ese eje.

- Se selecciona un punto de la bancada (punto fijo) y otro de la corredera (punto móvil); la distancia entre ellos es el desplazamiento que se requiere medir.
- El resultado se da respecto al tiempo de funcionamiento.

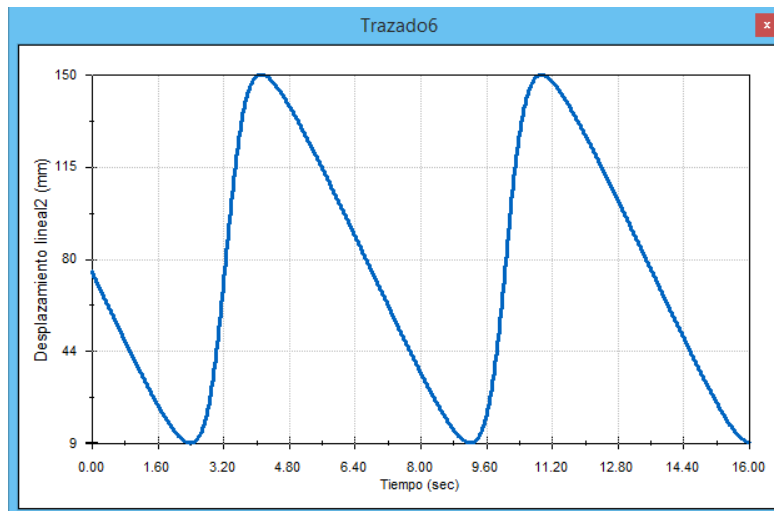


Figura 4.16 Ejemplo de gráfico de desplazamiento generado para el mecanismo de retorno rápido

Una vez se ha obtenido el gráfico deseado (Figura 4.16) se pueden exportar los datos del mismo a una hoja de cálculo en Excel. Mediante una operación muy sencilla con factores de conversión y sabiendo la velocidad a la que rota el motor, se pasa de unidades de tiempo a ángulo girado, que es la variable independiente que se quiere plasmar en el gráfico. El resultado es el que se aprecia en la siguiente expresión:

$$1 \text{ seg} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}} * \frac{20 \text{ rev}}{1 \text{ min}} * \frac{360^\circ}{1 \text{ rev}} = 120^\circ \quad (1)$$

Este ejemplo corresponde al de un motor que gira con una velocidad de rotación de 20 min^{-1} . Se obtiene que, por cada segundo de simulación, la pieza en cuestión ha rotado 120° , por lo tanto, multiplicando el tiempo obtenido en cada *frame* por 120 se hace la conversión de segundos a ángulo girado.

4.5. Creación del modelo por impresión 3D

En el caso del mecanismo de retorno rápido de Whitworth se decidió crear una maqueta real con la mayoría de piezas de dicho mecanismo impresas en una impresora 3D disponible en el Departamento de Ingeniería Mecánica (DEM) de la ETSEIB. Se optó por este mecanismo ya que, es un mecanismo clásico que es normalmente estudiado en los cursos de Teoría de Máquinas y Mecanismos y, por otro lado, porque a pesar de constar con pocos elementos en su estructura, éstos son variados y complejos.

La barra y la bancada del mecanismo, dadas sus dimensiones (no adecuadas para obtener por impresión 3D), fueron fabricadas con madera en el taller de carpintería del Departamento de Ingeniería Mecánica (Planos en el Anexo), el resto de elementos fueron fabricados por impresión 3D. A continuación, se explican los pasos en los que consiste la impresión 3D por filamento fundido, éstos son:

- **Creación del modelo 3D del objeto o pieza que se desea fabricar, utilizando un programa CAD, en este caso SolidWorks.** Es necesario realizar algunas modificaciones respecto a la pieza de la maqueta original para ahorrar material, para posteriormente añadir elementos que fortalezcan la pieza (como tornillos colocados en el interior de cavidades cilíndricas) y también para facilitar la propia impresión de la nueva pieza; esto comprende la inclusión de chaflanes, redondeados, radios de acuerdo, avellanados, aumento de tolerancias de los diámetros de los agujeros y disminución de éstas en los diámetros de los ejes, etc.
- **Generación del archivo STL (Standar Triangle Language).** Una vez se tiene la pieza deseada, se guarda en extensión .stl. Este formato de archivo CAD únicamente define la geometría de los objetos 3D, sin tener en cuenta otra información como color, textura, propiedades físicas, etc.
- **Reparación de superficies incorrectas.** Puede darse el caso en el que al exportar un archivo desde el programa CAD en formato STL, aparezcan defectos que hace que la pieza que se quiera fabricar no sea imprimible. Es entonces cuando se utiliza algún software (por ejemplo, NetFabb) que permite reparar el archivo STL de modo que puede ser impreso. En este proyecto no fue necesario hacer uso de dicho software.
- **Obtención del archivo con geometría por capas.** Se utiliza un programa (por ejemplo, el software Cura) que convierte el modelo 3D con extensión .stl en capas que son capaces de ser impresas una sobre otra por una impresora 3D. Este programa genera un archivo G-code (código de control numérico) mediante el cual se le dice a la impresora qué hacer y cómo hacerlo.
- **Impresión.** Se carga el archivo G-code en la impresora con una tarjeta SD o un USB y se realiza la impresión de la pieza.

- **Limpieza y acabado.** Aquí se pueden realizar distintas operaciones que permitan eliminar soportes de partes de la pieza, hilos de plásticos sobrantes, pintado de una superficie, etc. Todo ello para garantizar un mejor acabado y estética de la pieza impresa.

Los resultados de este capítulo se mostrarán tras haber estudiado los siete artefactos (capítulo 6) de forma que se pueda comparar el mecanismo original con el fabricado, tanto su modelo virtual como el físico.

5. Mecanismos elegidos para la Modelación y Simulación

A continuación, se describen y analizan los 7 mecanismos seleccionados. El orden en el que son presentados está basado en la simplicidad de su estructura, utilizando un criterio basado en número y tipología de elementos. El orden de explicación no es el mismo en el que se realizó el modelado 3D de éstos, pero ordenándolos gradualmente según su complejidad se espera que cada uno de ellos pueda entenderse mejor, es decir pasar de mecanismos de estructura más sencilla a estructura más compleja. Se han establecido dos grupos para clasificar los mecanismos; en primer lugar, se presentarán artefactos más comunes y simples y en segunda instancia, mecanismos más complejos y específicos.

5.1. Mecanismos presentes en máquinas o artefactos comunes

5.1.1. Mecanismo de descarga de una cisterna de baño

El primer mecanismo escogido es el mecanismo de descarga de una cisterna de pulsador simple; este tipo de mecanismo se usa desde hace décadas y es muy común ya que se encuentra con frecuencia en la mayoría de los hogares, aunque al no encontrarse a la vista puede ser difícil de identificar. El mecanismo presentado en este trabajo ha sido identificado a partir de la necesidad de su sustitución por uno nuevo idéntico.

En la parte superior del mecanismo (Figura 5.1) se encuentra el botón (pistón superior) que debe accionarse haciendo presión con el dedo. Al analizar la estructura de este mecanismo se observa que consta de una serie de elementos que transmiten el movimiento desde el botón hasta el tapón (pistón inferior), el cual se desplaza hacia arriba de forma que se produce un vacío por el que se evacuará el agua de la cisterna. Una vez se ha utilizado la cantidad de agua deseada, se deja de pulsar el botón y es el peso del propio tapón el que se encarga de devolverlo a su posición inicial, mientras que un muelle es el encargado de que el pulsador vuelva a su punto de partida. A simple vista el mecanismo tiene dos grados de libertad.



Figura 5.1 Fotografía del mecanismo de descarga de una cisterna

Una vez analizado el funcionamiento general del mecanismo, identificados y medidos cada uno de sus elementos, se procede a crear el modelo 3D (Figura 5.2), utilizando el código de colores previamente mencionado en el subapartado 4.2.2.

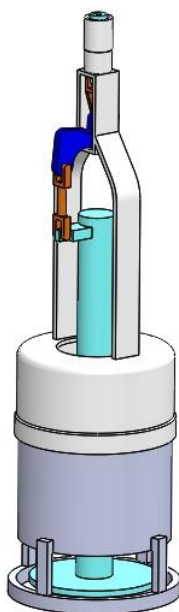


Figura 5.2 Modelo virtual en 3D del mecanismo de descarga de una cisterna

Seguidamente se presenta la vista en alzado del modelo 3D y en el mismo alzado se identifican y superponen los pares cinemáticos y elementos que forman el mecanismo (Figuras 5.3 y 5.4, respectivamente).

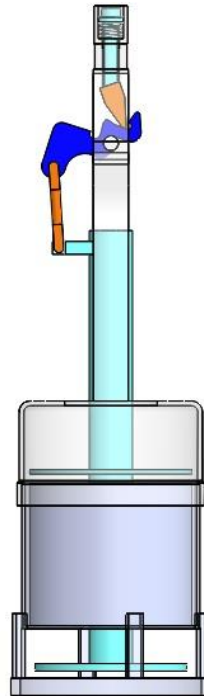


Figura 5.3 Vista en alzado del mecanismo de descarga de una cisterna

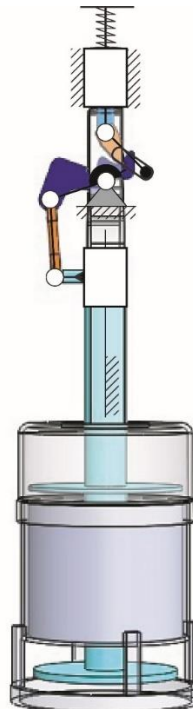


Figura 5.4 Vista en alzado con esquema de símbolos superpuesto en el mecanismo de descarga de una cisterna

A continuación, se extrae el esquema y se representa y enriquece en una figura aparte con los parámetros y variables geométricas a tener en cuenta (Figura 5.5).

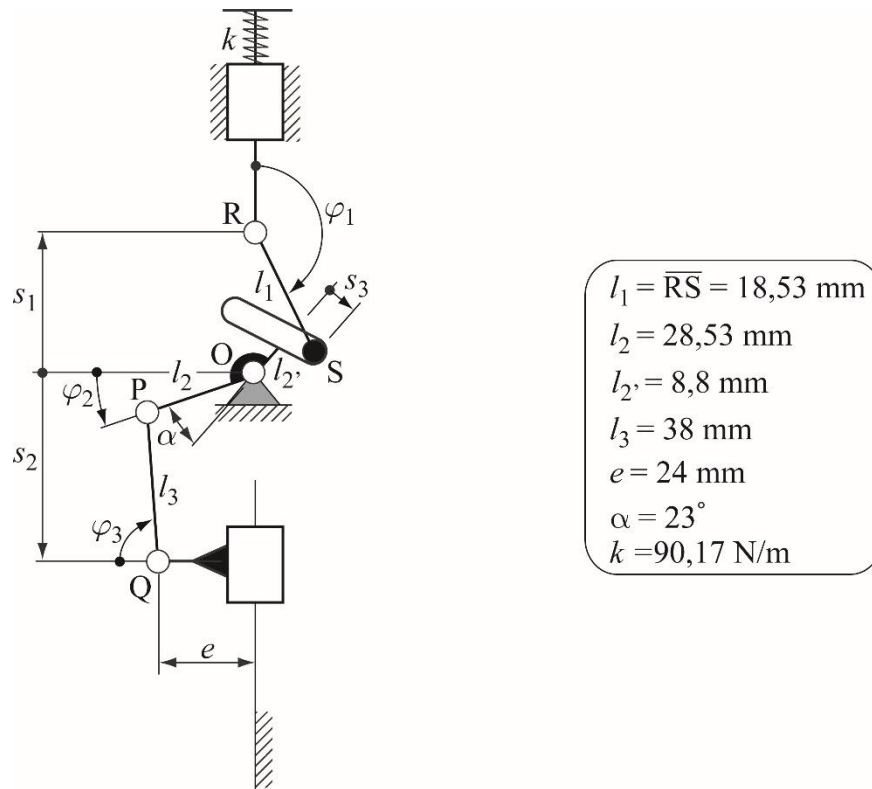


Figura 5.5 Esquema de símbolos con variables y parámetros del mecanismo de descarga de la cisterna

A partir del esquema se puede entender y explicar mejor su funcionamiento, que en este caso es el siguiente: Cuando se aplica una fuerza en la parte superior del pistón-pulsador (la fuerza se ejerce con el dedo de la persona), éste se desplaza hacia abajo, venciendo la fuerza de un resorte y comprimiéndolo. La biela RS está articulada al pistón en R, y se mueve hasta que el pasador S se encaja en el extremo de la guía del balancín PO y hace rotar al mismo entorno a la articulación fija O. Esta parte superior del mecanismo (pistón y biela) trabaja en vacío hasta que el pasador S topa con el final de la guía. Al rotar el balancín PO la biela QP se desplaza, y arrastra hacia arriba al pistón articulado en Q, permitiendo la abertura de la boca del conducto por el que se evacuará el agua de la cisterna. Una vez ya ha salido una cantidad suficiente de agua, deja de aplicarse la fuerza en el pulsador y, por efecto de la gravedad, el pistón inferior (tapón) cae y cierra la boca del conducto y el pistón superior (pulsador) es accionado por el resorte y todo el mecanismo vuelve a su posición inicial de funcionamiento.

Para calcular la constante de elasticidad k del muelle se utiliza la fórmula para resortes de tasa constante [11]:

$$k = \frac{d^4 * G}{8 * D^3 * N_a} = 90,17 \frac{N}{m} \quad (2)$$

- k = constante de elasticidad
- d = diámetro del alambre = 0,5 mm = 0,0005 m
- D = diámetro exterior del muelle = 10 mm = 0,010 m
- G = módulo de elasticidad = 80,8 GPa (para aleaciones de acero) = 80,8*10⁹ N/m²
- N_t = número de espiras totales = 9
- $N_a = N_t - 2$ = número de espiras activas = 7

El vector de coordenadas generalizadas que se utilizará para el estudio este mecanismo es el siguiente: $q = \{\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, s_1, s_2\}^t$. Por inspección directa el mecanismo tiene dos grados de libertad, a continuación, se aplica el criterio de Grübler-Kutzbach para comprobar si el mecanismo presenta redundancias totales (ecuación 3).

$$\text{gdl} = 5 \text{ sólidos móviles} \times 3 \text{ gdl/sólido} - 4 \text{ articulaciones} \times 2 \text{ gdl/articulación} - 2 \text{ par prismático} \times 2 \text{ gdl/par prism.} - 1 \text{ pasador-guía} \times 1 \text{ gdl/pasador-guía} = 2 \text{ gdl} \quad (3)$$

Por lo tanto, el mecanismo tiene dos grados de libertad y ninguna redundancia (ecuación 4).

$$\text{Grado Redundancia} = \text{Grado Libertad Real} - \text{Grado Libertad Grübler} = 1 \quad (4)$$

Estudiado y comprendido el funcionamiento del mecanismo y realizado su modelo 3D y esquema de símbolos, se pasa a animar y renderizar el mecanismo.

El último paso es el de realizar un estudio cinemático, en este caso la variable independiente será el desplazamiento vertical s_1 del punto R (que corresponde al pulsador): y la variable dependiente es el desplazamiento vertical s_2 del punto Q (correspondiente al tapón). En la Figura 5.6 se muestra el gráfico correspondiente.

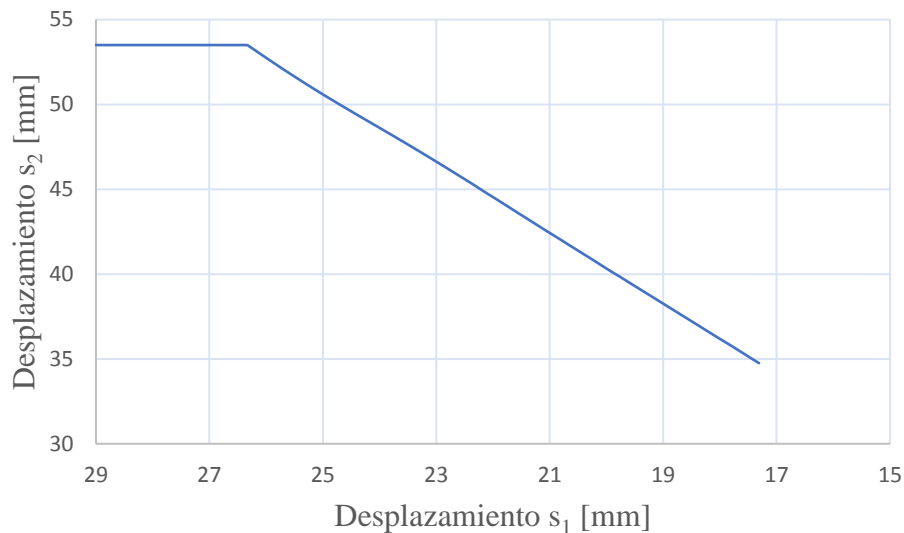


Figura 5.6 Gráfico que relaciona el desplazamiento vertical del punto R (s_1) vs el desplazamiento vertical del punto Q (s_2)

Del gráfico anterior, se puede apreciar como en un principio el mecanismo trabaja en vacío hasta el momento en el que el punto S (pasador) alcanza el final de la guía del balancín. A partir de ese momento, a medida que el pulsador se desplaza hacia abajo, el tapón se desplaza hacia arriba, habiendo una relación lineal entre ambos parámetros.

Los valores obtenidos en el gráfico son coherentes con los desplazamientos medidos en el mecanismo real con un pie de rey, por lo tanto, se demuestra la idoneidad de este modelo virtual para el estudio.

5.1.2. Báscula Postal Mecánica (Pesa Cartas)

El segundo mecanismo seleccionado es una báscula postal bilateral antigua (Figura 5.7). Su función es la de medir el peso de una carta de la siguiente manera: se coloca una carta en la base superior (bandeja) con lo que ésta se desplaza verticalmente hacia abajo, el movimiento se transmite a dos barras simétricas que finalmente producen una rotación en ambas mandíbulas con los contrapesos. Al rotar las mandíbulas, la aguja marcará un peso en la escala de gramos. A simple vista el mecanismo tiene un grado de libertad.

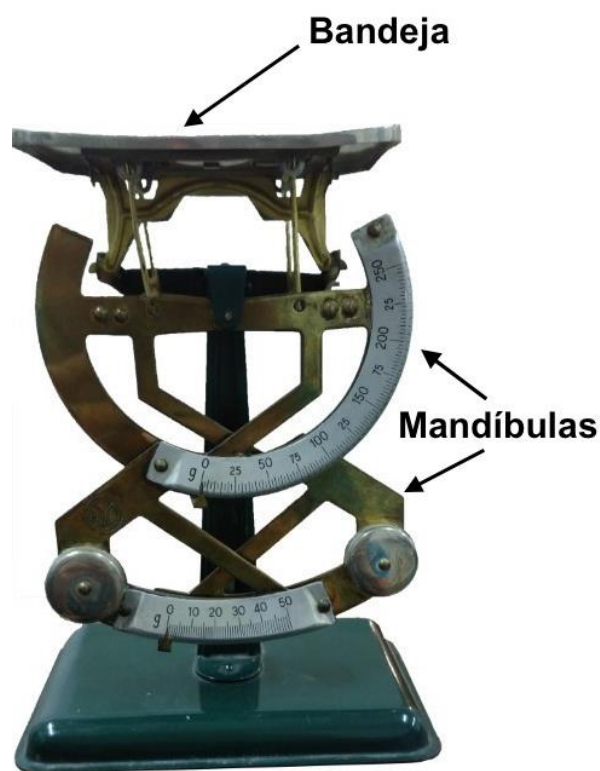


Figura 5.7 Fotografía de la báscula postal mecánica (Pesa cartas)

Una vez analizado el funcionamiento general del mecanismo, identificados y medidos cada uno de sus elementos, se procede a crear el modelo 3D (Figura 5.8), utilizando el código de colores previamente mencionado en el subapartado 4.2.2

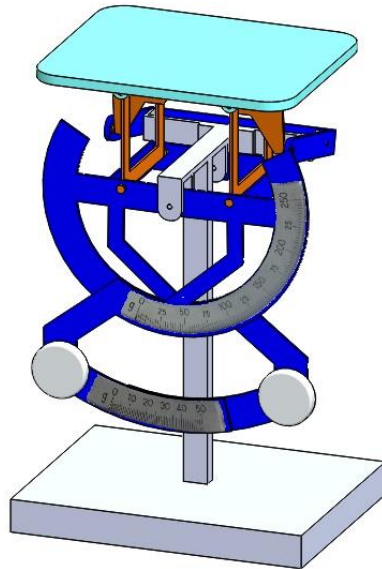


Figura 5.8 Modelo virtual en 3D de la báscula postal mecánica

Seguidamente se presenta la vista en alzado del modelo 3D y en el mismo alzado se identifican y superponen los pares cinemáticos y elementos que forman el mecanismo (Figuras 5.9 y 5.10, respectivamente).

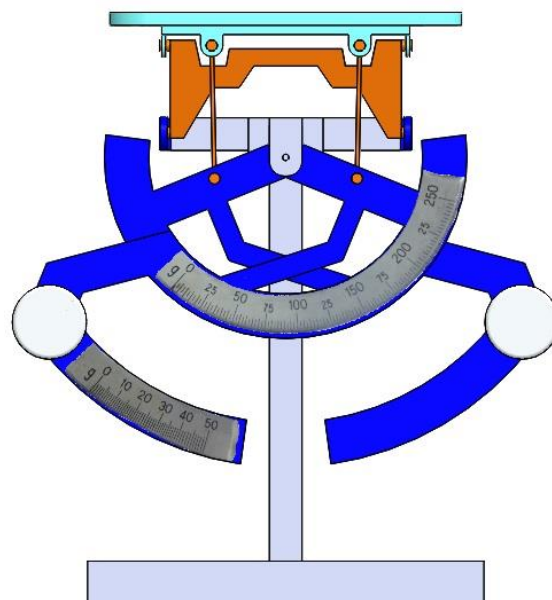


Figura 5.9 Vista en alzado de la báscula postal

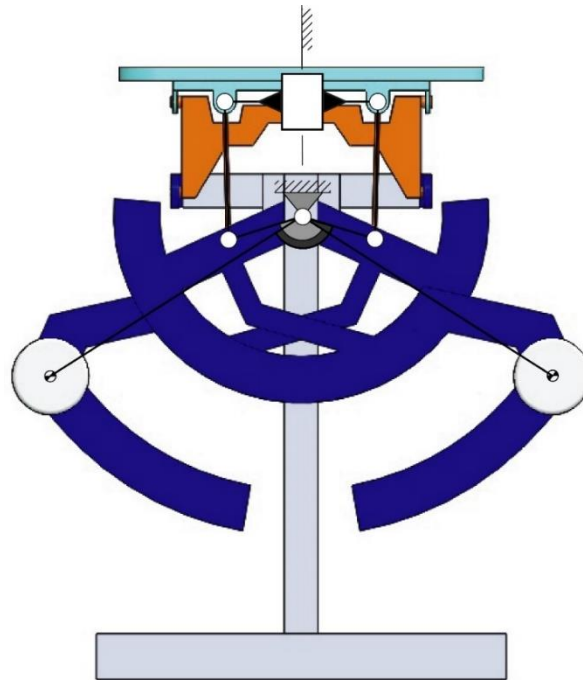


Figura 5.10 Vista en alzado con esquema de símbolos superpuesto en la báscula postal

A continuación, se extrae el esquema y se representa y enriquece en una figura aparte con los parámetros y variables geométricas a tener en cuenta (Figura 5.11).

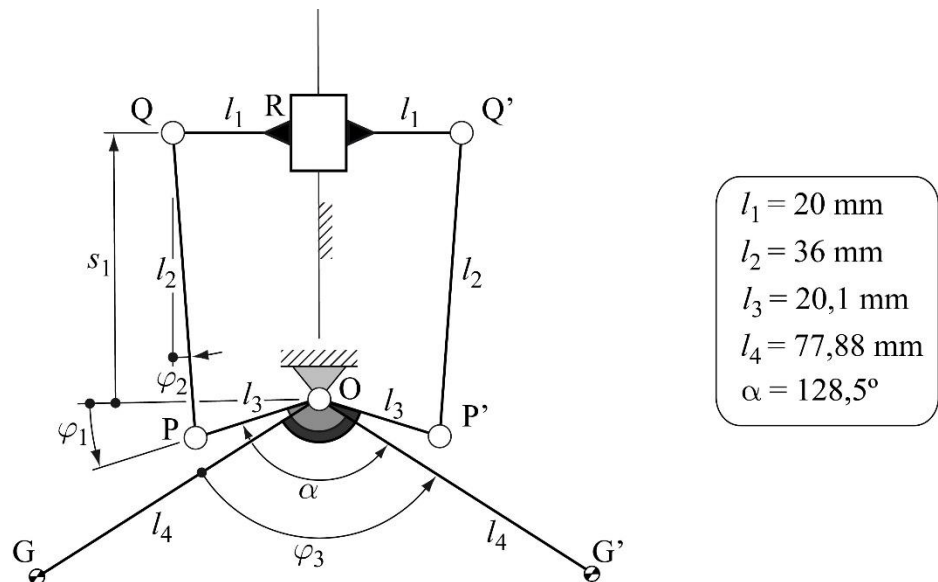


Figura 5.11 Esquema de símbolos con variables y parámetros de la báscula postal

A partir del esquema, se describe más detalladamente su funcionamiento, que es el siguiente: Al colocar la carta sobre la báscula, la corredera R (bandeja) se desplaza verticalmente hacia abajo junto con las barras QR y Q'R ya que ambas son solidarias a la corredera. Al desplazarse las articulaciones Q y Q', los otros extremos de las bielas QP y Q'P' también descienden. Esto produce que los balancines GOP' y G'OP roten sincronizadamente entorno al punto fijo O. Las articulaciones P y P' se desplazan hacia abajo por lo tanto G y G' (los contrapesos) suben; una vez el mecanismo se haya estabilizado en una posición, aparece señalado por la aguja el peso de la carta que se quiere medir. Una vez la carta se retira de la base superior, el mecanismo actúa a la inversa por el efecto de las masas de los contrapesos y de la gravedad, vuelve a su posición inicial.

El vector de coordenadas generalizadas que se utilizará para el estudio este mecanismo es el siguiente: $q = \{\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, s_1\}^t$. Por inspección directa el mecanismo tiene un grado de libertad, a continuación, se aplica el criterio de Grübler-Kutzbach para comprobar si el mecanismo presenta redundancias totales (ecuación 5).

$$gdl = 5 \text{ sólidos móviles} \times 3gdl/\text{sólido} - 6 \text{ articulaciones} \times 2gdl/\text{artic.} - 1 \text{ par prism.} \times 2gdl/\text{par prism} = 1gdl \quad (5)$$

A partir de la ecuación 4 se obtiene que el mecanismo no presenta redundancias

Estudiado y comprendido el funcionamiento del mecanismo y realizado su modelo 3D y esquema de símbolos, se pasa a animar y renderizar el mecanismo.

El último paso es el de realizar un estudio cinemático, en este caso la variable independiente será el desplazamiento vertical s_1 de la bandeja (punto R) y la variable dependiente será el ángulo de giro φ_1 de las mandíbulas respecto a la horizontal. En la Figura 5.12 se muestra en gráfico correspondiente.

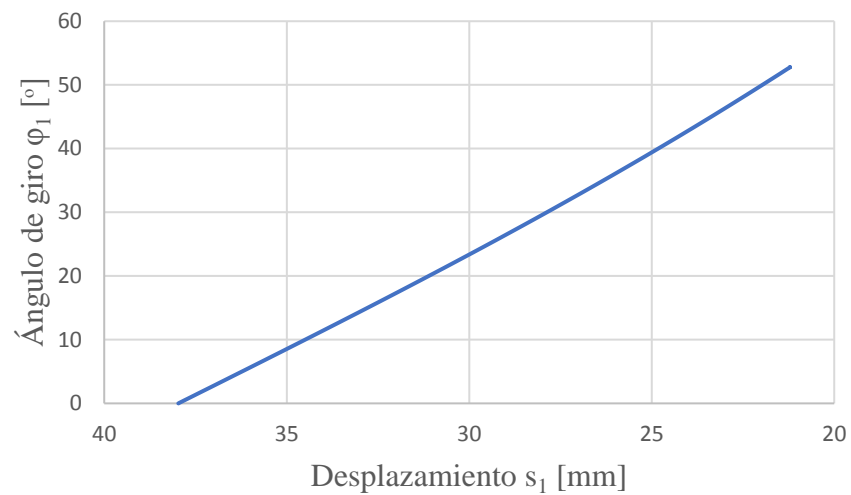


Figura 5.12 Gráfico que relaciona el desplazamiento vertical del punto R (s_1) vs el ángulo de giro (φ_1) de las mandíbulas

Se puede observar en el gráfico como se establece una relación prácticamente lineal entre ambas variables estudiadas.

Los valores obtenidos en el gráfico son coherentes con los desplazamientos medidos en el mecanismo real con un pie de rey, por lo tanto, se demuestra la idoneidad de este modelo virtual para el estudio.

5.1.3. Juguete Robot Andador

El tercer artefacto seleccionado es un juguete Robot Andador (Figura 5.13), adquirido en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la ETSEIB, para la impartición de la asignatura Teoría de Máquinas y Mecanismos. Este Robot consta en su estructura de un motor eléctrico rotativo de corriente continua, que actúa como actuador que hace rotar un piñón motriz. Esta rotación se transmite, a través de una serie de engranajes y piñones distribuidos en ejes paralelos, hasta hacer rotar las dos manivelas de los mecanismos de barras que accionan a los brazos y las piernas del robot. La rotación alternativa de las bielas que constituyen las piernas del robot, hace que el mismo avance. A su vez estas bielas accionan los balancines superiores provocando la oscilación de los brazos. A simple vista el mecanismo tiene un grado de libertad.

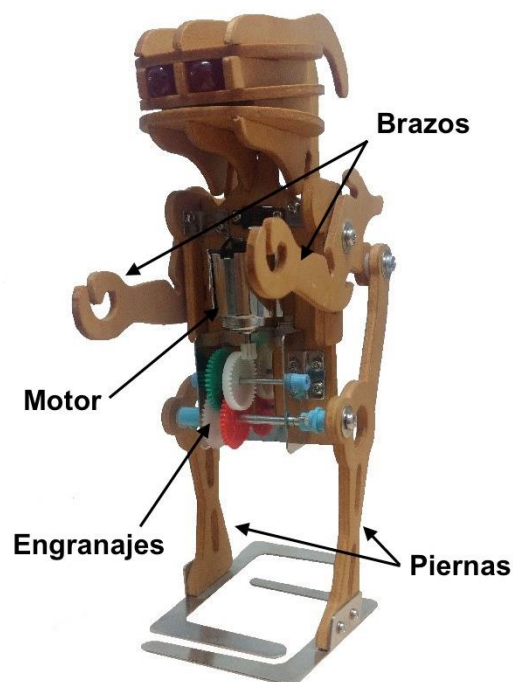


Figura 5.13 Fotografía del juguete robot andador

Una vez analizado el funcionamiento general del mecanismo, identificados y medidos cada uno de sus elementos, se procede a crear el modelo 3D (Figura 5.14), utilizando el código de colores previamente mencionado en el subapartado 4.2.2.

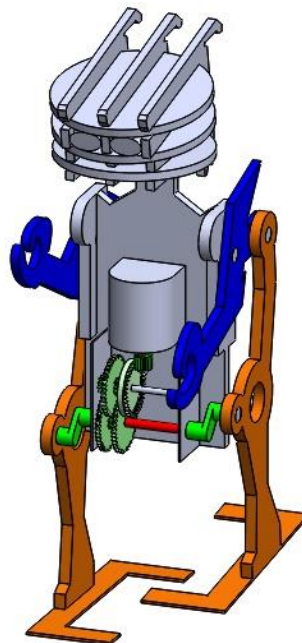


Figura 5.14 Modelo virtual en 3D del juguete robot andador

Seguidamente se presenta la vista en alzado del modelo 3D y en el mismo alzado se identifican y superponen los pares cinemáticos y elementos que forman el mecanismo (Figuras 5.15 y 5.16, respectivamente).

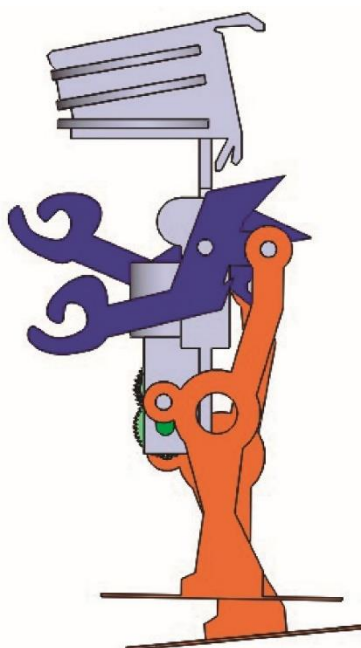


Figura 5.15 Vista en alzado del Robot andador

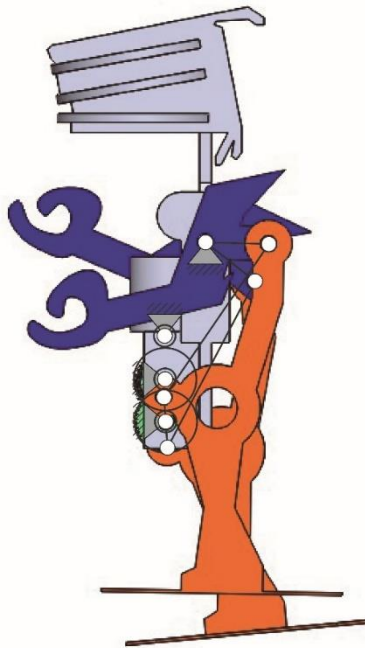


Figura 5.16 Vista en alzado con esquema de símbolos superpuesto en el robot andador

A continuación, se extrae el esquema y se representa y enriquece en una figura aparte con los parámetros y variables geométricas a tener en cuenta (Figura 5.17). En este caso en particular se ha incluido una vista lateral del mecanismo de ruedas dentadas además del alzado, con la intención de que se pueda apreciar correctamente como están situadas las ruedas dentadas y cómo engranan unas con otras.

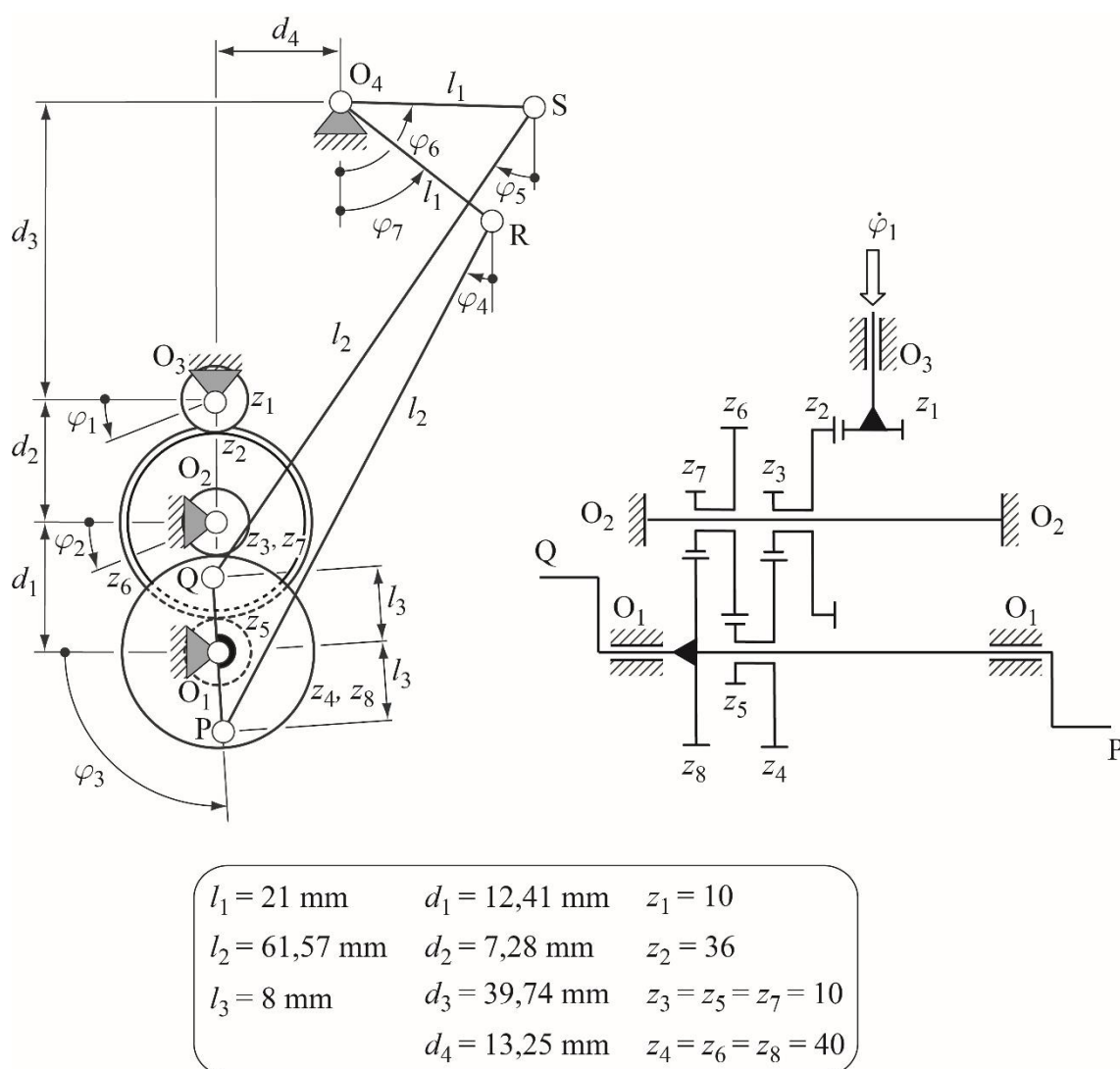


Figura 5.17 Esquema de símbolos con variables y parámetros del mecanismo de descarga del robot andador

La transmisión dentada consta de cuatro etapas de reducción. A continuación, se muestran las relaciones de transmisión correspondiente a cada etapa:

- Relación de transmisión entre z_1 y z_2 : $\tau_1 = \frac{z_1}{z_2} = \frac{10}{36} = 0,28$ (6)

- Relación de transmisión entre z_3 y z_4 : $\tau_2 = \frac{z_3}{z_4} = \frac{10}{40} = 0,25$ (7)

- Relación de transmisión entre z_5 y z_6 : $\tau_3 = \frac{z_5}{z_6} = \frac{10}{40} = 0,25$ (8)

- Relación de transmisión entre z_7 y z_8 : $\tau_4 = \frac{z_7}{z_8} = \frac{10}{40} = 0,25$ (9)

Por lo tanto, la relación de transmisión global es¹:

$$\tau = \tau_1 * \tau_2 * \tau_3 * \tau_4 = 4,375 * 10^{-3} \quad (10)$$

A partir del esquema de símbolos mostrado en la Figura 5.17, se procede a explicar en detalle el funcionamiento del mecanismo del robot: el motor hace rotar un eje motriz (O_3) solidario al piñón de z_1 dientes. La rotación del piñón se transmite a una corona dentada de z_2 dientes centrada en O_2 (en realidad un eje fijo, alrededor del cual ésta rota), la cual es solidaria a otro piñón de z_3 dientes. Este piñón engrana con una rueda dentada de z_4 dientes que se encuentra en el eje inferior (O_1 en el esquema 2D). Al igual que antes, este engranaje también es solidario a un piñón de z_5 dientes. El piñón engrana con la rueda dentada de z_6 dientes centrada en O_2 , que también es solidario a un piñón igual a los anteriores el cual transmite movimiento al último engranaje de z_8 dientes con centro en O_1 . El eje inferior no tiene bloqueada la rotación; es un eje motriz, y es a su vez solidario a este último engranaje y a las dos manivelas O_1P y O_1Q que están orientadas a 180 grados una de la otra. La rotación de las manivelas origina el movimiento de las bielas PR y QS , que son las dos piernas del robot. Los brazos del robot están articulados a las piernas por sus extremos S y R y también articulados a la bancada a través en el punto O_4 . Por lo tanto, al moverse las dos bielas también oscilan los dos balancines (brazos) O_4S y O_4R .

El vector de coordenadas generalizadas que se utilizará para el estudio este mecanismo es el siguiente: $q = \{\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5, \varphi_6, \varphi_7\}^t$. Por inspección directa el mecanismo tiene 1 grado de libertad, a continuación, se aplica el criterio de Grübler-Kutzbach para comprobar si el mecanismo presenta redundancias totales (ecuación 11).

$$gdl = 9 \text{ sólidos móviles} \times 3gdl/\text{sólido} - 11 \text{ artic.} \times 2gdl/\text{articulación} - 4 \text{ transmisiones} \times 1gdl/\text{transmisión} = 1 \text{ gdl} \quad (11)$$

¹ Son solidarias entre sí las ruedas de dientes: z_2 y z_3 , z_4 y z_5 , z_6 y z_7 .

A partir de la ecuación 4 se obtiene que el mecanismo no presenta redundancias.

Estudiado y comprendido el funcionamiento del mecanismo y realizado su modelo 3D y esquema de símbolos, se pasa a animar y renderizar el mecanismo.

El último paso es el de realizar un estudio cinemático; en un primer gráfico la variable independiente será el ángulo de giro φ_3 de la manivela O_1P (a su vez del engranaje de z_8 dientes) y las variables dependientes serán los desplazamientos angulares φ_4 y φ_5 de las piernas. Se ha utilizado el ángulo de giro φ_3 del eje inferior y no el del motor (φ_1) ya que éste gira a una velocidad muy elevada y los valores para el ángulo eran demasiado altos (Figura 5.18).

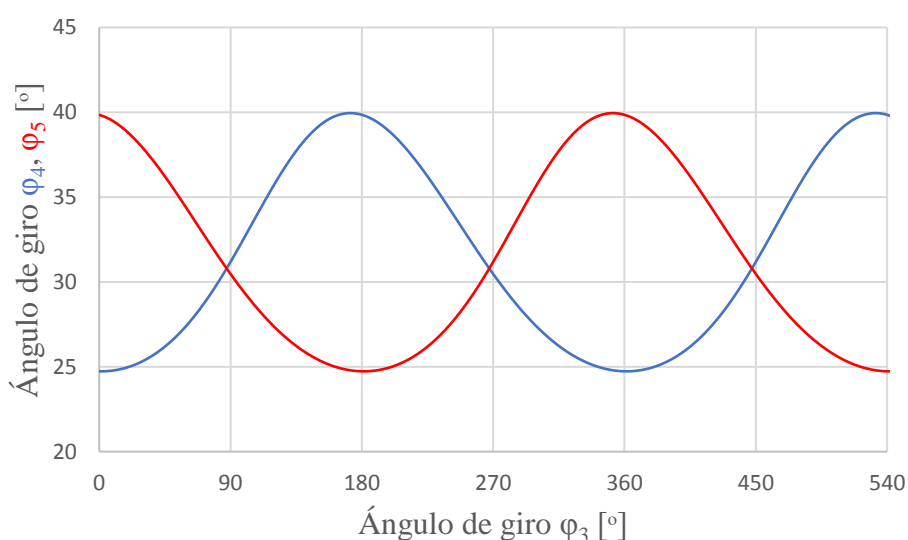


Figura 5.18 Gráfico que relaciona el ángulo de giro de la manivela (φ_3) vs los desplazamientos angulares de las piernas (φ_4 y φ_5)

Se puede observar cómo ambas piernas tienen el mismo desplazamiento angular, solo que existe un desfase entre ellos de 180°. Los resultados obtenidos han sido validados en el modelo real con un transportador, por lo tanto, se demuestra la idoneidad de este modelo virtual para el estudio.

Se elabora un segundo gráfico (Figura 5.19) en el que de nuevo la variable independiente será φ_3 , pero esta vez las variables dependientes serán los desplazamientos angulares de los brazos: φ_6 y φ_7

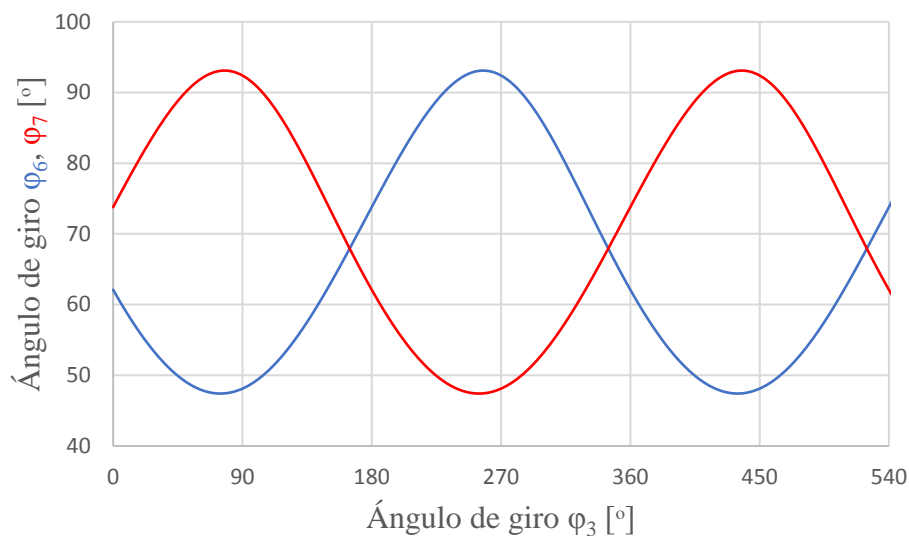


Figura 5.19 Gráfico que relaciona el ángulo de giro de la manivela (ϕ_3) vs los desplazamientos angulares de los brazos (ϕ_6 y ϕ_7)

Los valores obtenidos en el gráfico anterior son coherentes con los desplazamientos medidos en el mecanismo real con un transportador de ángulos, por lo tanto, se demuestra la idoneidad de este modelo virtual para el estudio. Como en el gráfico anterior, también existe un desfase entre brazos de 180°.

5.2. Mecanismos de estructura compleja

5.2.1. Mecanismo de retorno rápido de Whitworth

El cuarto mecanismo que se estudia es el de retorno rápido, este nombre viene dado por el comportamiento que tiene la corredera en la parte superior de la maqueta (Figura 5.18); ésta realiza una trayectoria alternativa y simétrica respecto al eje vertical de simetría de la bancada que pasa por el centro de la guía, destacando en su funcionamiento que el tiempo de desplazamiento hacia un lado (fase de trabajo) es mucho menor que al volver (fase de retorno o vacío), de ahí su nombre. Este sistema se utiliza en máquinas-herramientas denominadas limadoras o cepilladoras en las que la acción de trabajo se produce en el proceso de arranque de virutas de un metal en la fase de trabajo y en la fase de vacío la herramienta vuelve a su posición inicial. [12]

Este mecanismo se acciona girando la manivela, montada en un eje sobre el cual también es solidario un piñón motriz (Figura 5.18). A través de engranajes, barras y guías el movimiento se transmite a la corredera, que tiene un desplazamiento oscilante horizontal. Este mecanismo tiene un grado de libertad.

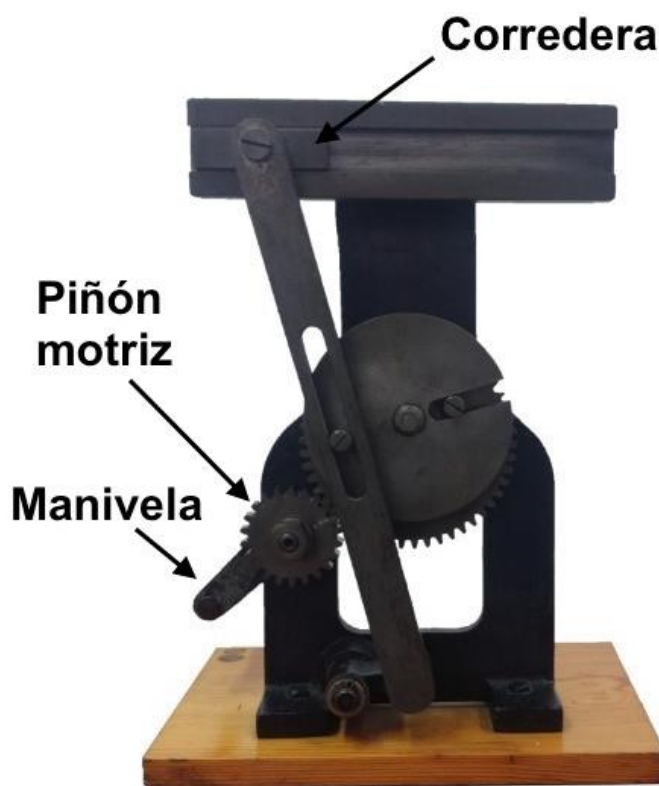


Figura 5.20 Fotografía del mecanismo de retorno rápido de Whitworth

Una vez analizado el funcionamiento general del mecanismo, identificados y medidos cada uno de sus elementos, se procede a crear el modelo (Figura 5.21), utilizando el código de colores previamente mencionado en el subapartado 4.2.2.

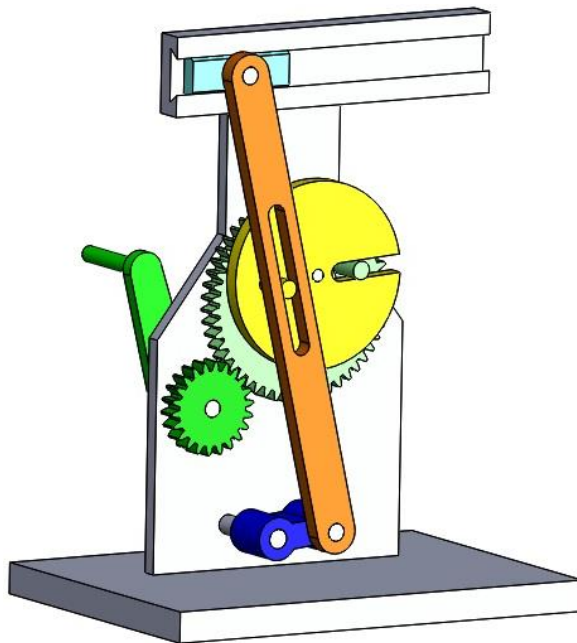


Figura 5.21 Modelo virtual en 3D del mecanismo de retorno rápido de Whitworth

Seguidamente, se presenta la vista en alzado del modelo 3D y en el mismo alzado se identifican y superponen los pares cinemáticos y elementos que forman el mecanismo (Figuras 5.22 y 5.23 respectivamente).

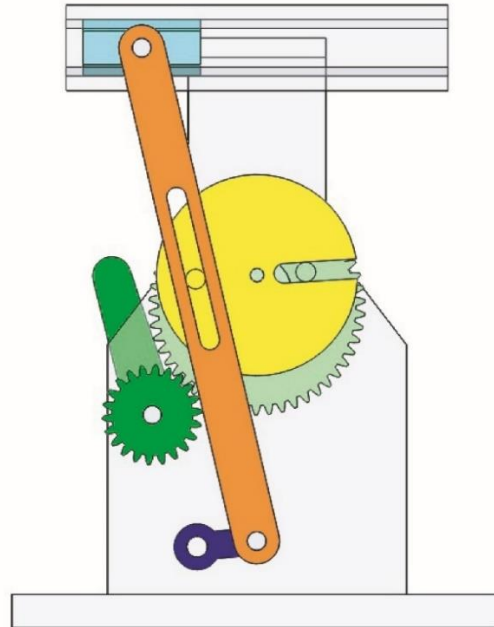


Figura 5.22 Vista en alzado del mecanismo de retorno rápido

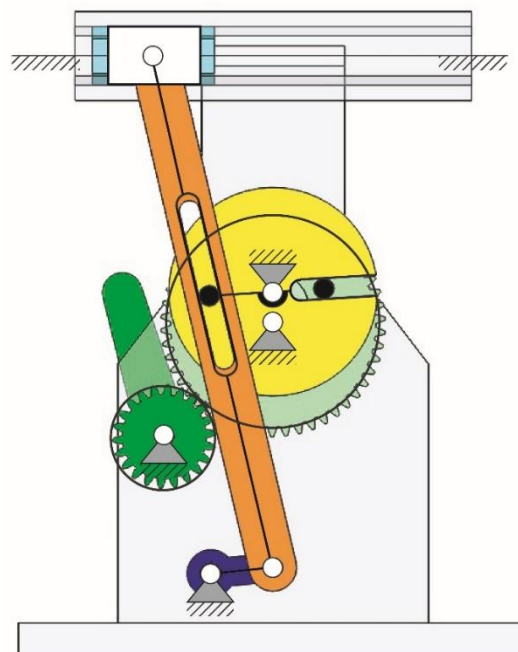


Figura 5.23 Vista en alzado con esquema de símbolos superpuesto en el mecanismo de retorno rápido

A continuación, se extrae el esquema y se representa y enriquece en una figura aparte con los parámetros y variables geométricas a tener en cuenta (Figura 5.24).

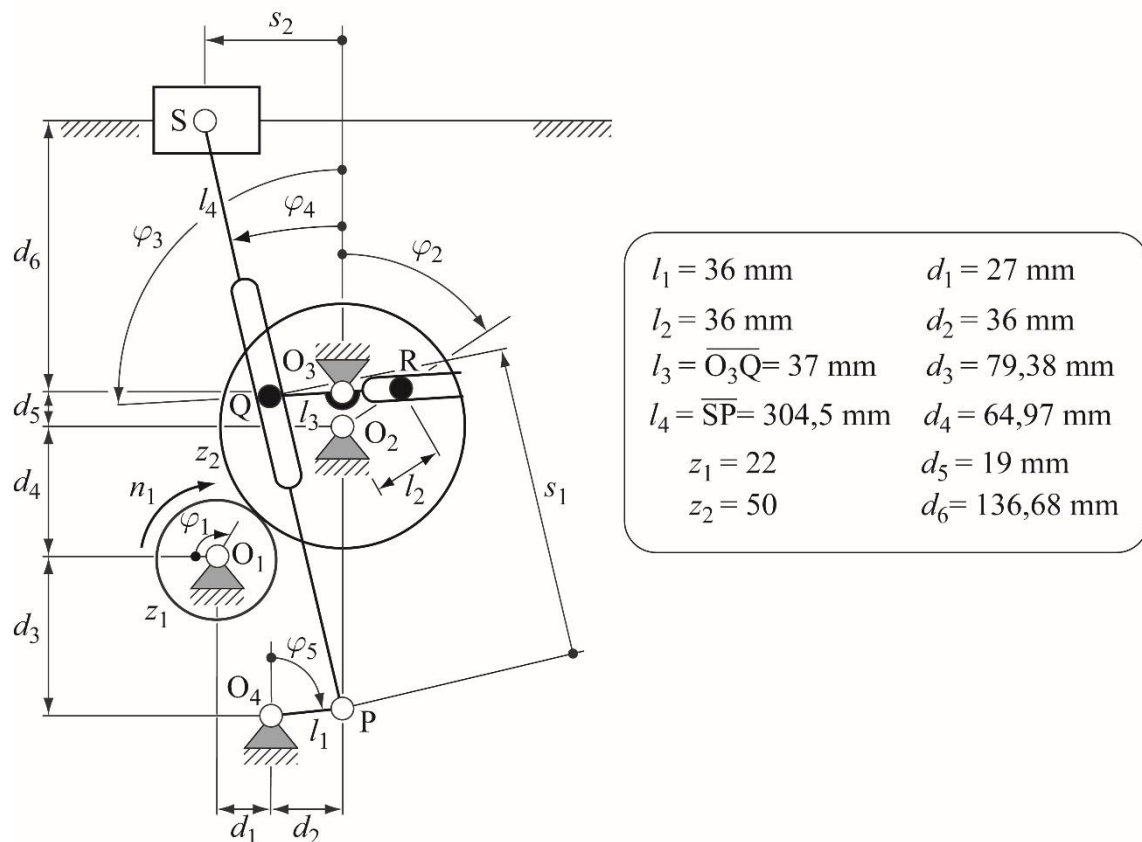


Figura 5.24 Esquema de símbolos con variables y parámetros del mecanismo de retorno rápido

Se calcula en primera instancia la relación de transmisión que se da entre la rueda dentada de entrada (la de z_1 dientes) con la rueda dentada de salida (de z_2 dientes):

$$\tau = \frac{z_1}{z_2} = \frac{22}{50} = 0,44 \quad (12)$$

A partir del esquema de símbolos se explica el funcionamiento detallado del mecanismo, este es: se acciona manualmente la manivela, la cual es solidaria al piñón de z_1 dientes (entrada de movimiento). Éste también gira y transmite el movimiento al engranaje de z_2 dientes con centro en O_2 , garantizando una relación de transmisión antes calculada. El segundo engranaje transmite a través de su pivote integrado R el giro a la rueda que contiene por una parte una guía (ranura) y por otra un pasador Q. Ésta rueda rota alrededor de la articulación fija O_3 y al girar acciona la biela PS articulada por la parte inferior al balancín OP y por la parte superior a la corredera en S, la cual es el elemento de salida del movimiento del mecanismo y la que realiza el trabajo.

El vector de coordenadas generalizadas que se utilizará para el estudio este mecanismo es el siguiente: $q = \{\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5, s_1, s_2\}^t$. Por inspección directa el mecanismo tiene un grado de libertad, a continuación, se aplica el criterio de Grübler-Kutzbach para comprobar si el mecanismo presenta redundancias totales (ecuación 13).

$$gdl = 6 \text{ sólidos móviles} \times 3gdl/sólido - 6 \text{ artic} \times 2gdl/artic. - 1 \text{ prism.} \times 2gdl/prism - 2 \text{ pasador} \times 1gdl/pasador - 1 \text{ transm.} \times 1gdl/transm = 1gdl \quad (13)$$

A partir de la ecuación 4 se obtiene que el mecanismo no presenta redundancias.

Estudiado y comprendido el funcionamiento del mecanismo y realizado su modelo 3D y esquema de símbolos, se pasa a animar y renderizar el mecanismo.

El último paso es el de realizar un estudio cinemático, en este caso la variable independiente será el ángulo de giro φ_1 de la manivela (a su vez del engranaje). La variable dependiente es el desplazamiento horizontal s_2 del punto S correspondiente a la corredera (Figura 5.23).

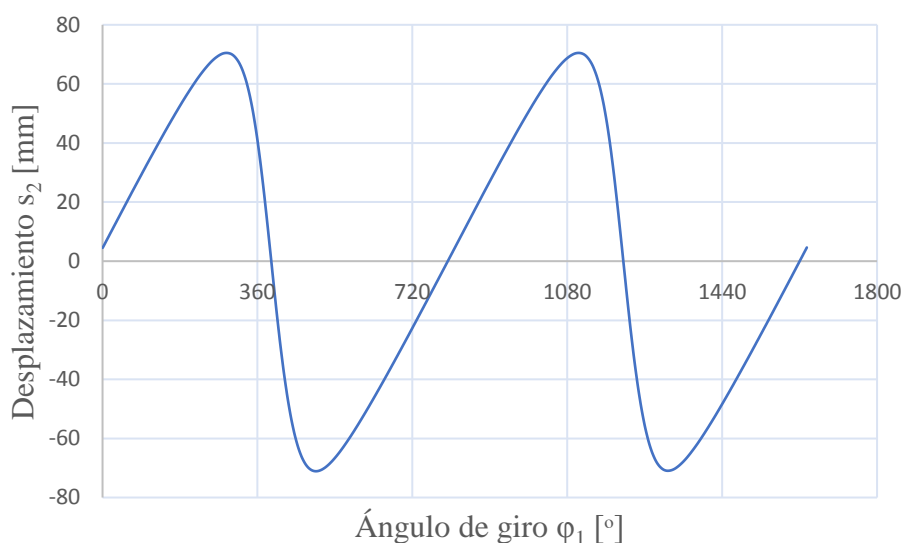


Figura 5.25 Gráfico que relaciona el ángulo de giro de la manivela (φ_1) vs el desplazamiento horizontal de la corredera (s_2)

En el gráfico se puede constatar el porqué del nombre de este mecanismo: la corredera necesita media vuelta de la manivela para ir de un extremo al otro, mientras que para la vuelta necesita de casi dos vueltas. Por lo tanto, se desplaza mucho más rápido en un sentido.

Los valores obtenidos en el gráfico son coherentes con los desplazamientos medidos en el mecanismo real con un pie de rey, por lo tanto, se demuestra la idoneidad de este modelo virtual para el estudio.

5.2.2. Máquina de vapor de Watt

El quinto mecanismo estudiado es una máquina de vapor de Watt (Figura 5.26). La máquina de vapor fue creada por James Watt a finales del siglo XVIII; esta máquina transforma energía calorífica (al calentar el agua y convertirla en vapor) en energía mecánica (al hacer girar del volante de inercia). [13]

El movimiento surge a partir de dos cilindros o cámaras, cada una de ellas contiene un pistón. Las cámaras están conectadas por dos orificios, por los que entrará vapor caliente o se evacuará aire frío en función del momento del ciclo en que se encuentre la máquina. En el primer cilindro el pistón actúa como válvula; permitirá la entrada de vapor caliente en el cilindro vecino o permitirá la expulsión de aire frío proveniente de ese mismo cilindro contiguo. Esta válvula consta de una cavidad por la que circulará el aire frío hasta el conducto de escape. Es preciso que sea así ya que de otra manera se mezclarían vapor de agua caliente y frío en este primer cilindro. En esta primera cámara hay dos conductos, uno por el que entrará el vapor de agua caliente y otro por el que se evacuará el vapor de agua frío. A simple vista el mecanismo tiene un grado de libertad.



Figura 5.26 Fotografía de la máquina de vapor de Watt

El funcionamiento de esta máquina de vapor no es trivial y se explica en 4 eventos que forman un ciclo. Para ello se utiliza la Figura 5.27. Los eventos citados son:

- La primera etapa es la **admisión** de vapor caliente, procedente de la caldera no mostrada en la figura. El vapor sale a alta temperatura de la caldera y llega por un conducto al cilindro donde se encuentra la válvula. La válvula permite el paso del aire caliente al segundo cilindro a través de un orificio. (Ilustración 1 de la Figura 5.27)
- La segunda parte es la **expansión** del vapor debido a su alta presión; esto provoca el desplazamiento del pistón hacia el otro extremo, que a su vez produce el movimiento de la rueda o volante de inercia a través de una biela, y la manivela solidaria al eje del volante. A su vez, el volante transmite su movimiento a través de una rueda excéntrica, una barra y un balancín, a la válvula, la cual cerrará la entrada de vapor mientras se sigue dando el proceso de expansión, generándose de esta manera un movimiento recíproco. (Ilustración 2 de la Figura 5.27).
- El tercer evento es el de **escape** del vapor. Cuando el pistón ha llegado al final de su recorrido, la propia inercia del volante provoca que el pistón inicie el retorno a su posición inicial. En este momento el aire que ya ha perdido su alta temperatura se evacua a través de una cavidad de la válvula de nuevo a la caldera, donde volverá a ser calentado. (Ilustración 3 de la Figura 5.27)
- La última parte es la **compresión**, en la que todo el aire frío ya ha sido expulsado hacia la caldera y el pistón está en su posición de partida. Es entonces cuando se vuelve a dar el proceso de expansión. (Ilustración 4 de la Figura 5.27)

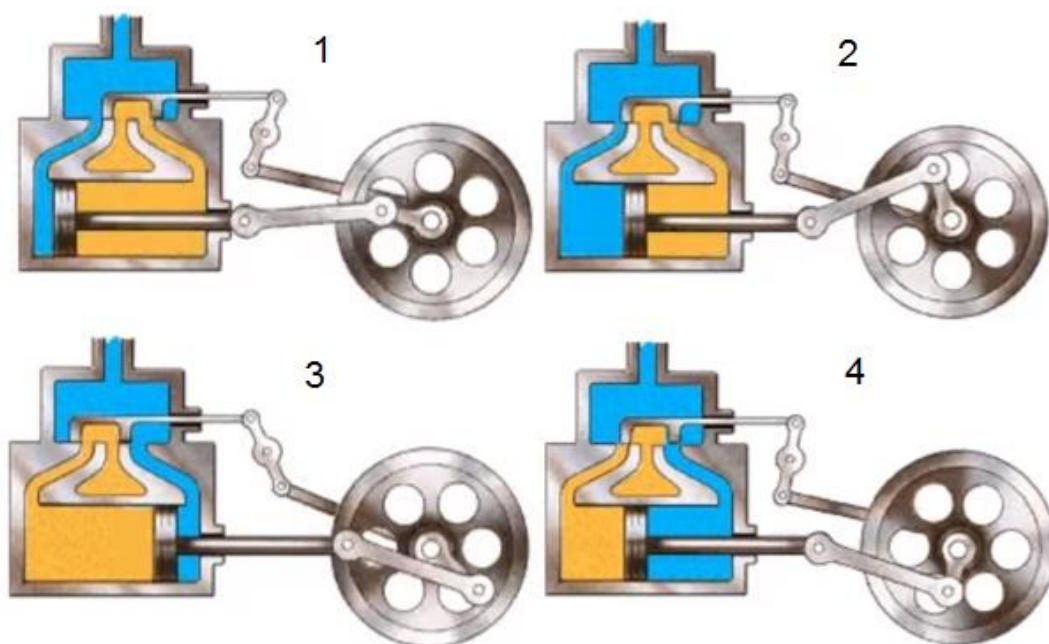


Figura 5.27 Las cuatro diferentes etapas del funcionamiento del motor de vapor (el fluido azul es el vapor de agua caliente) [13]

Una vez analizado el funcionamiento general del mecanismo, identificados y medidos cada uno de sus elementos, se procede a crear el modelo 3D (Figura 5.28), con el código de colores previamente mencionado en el subapartado 4.2.2.

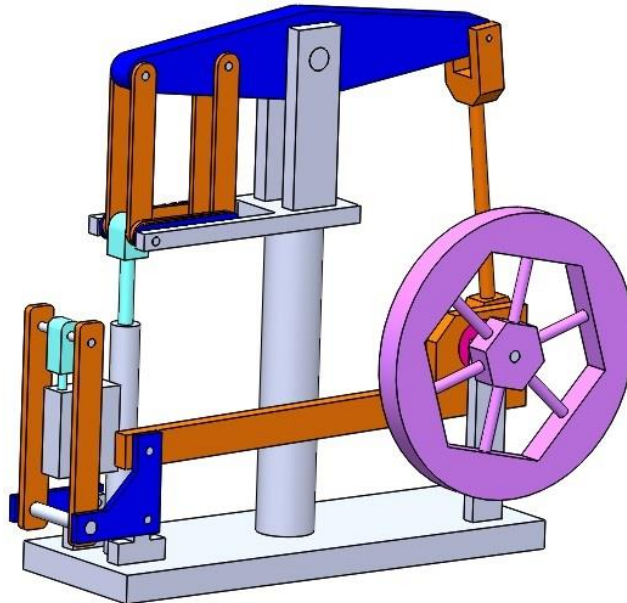


Figura 5.28 Modelo virtual en 3D de la máquina de vapor de Watt

Seguidamente se presenta la vista en alzado del modelo 3D y en el mismo alzado se identifican y superponen los pares cinemáticos y elementos que forman el mecanismo (Figuras 5.29 y 5.30 respectivamente)

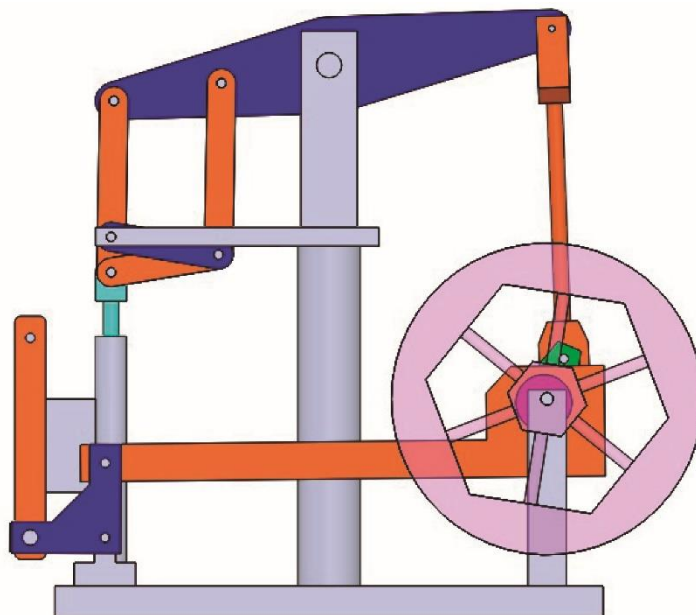


Figura 5.29 Vista en alzado de la máquina de vapor de Watt

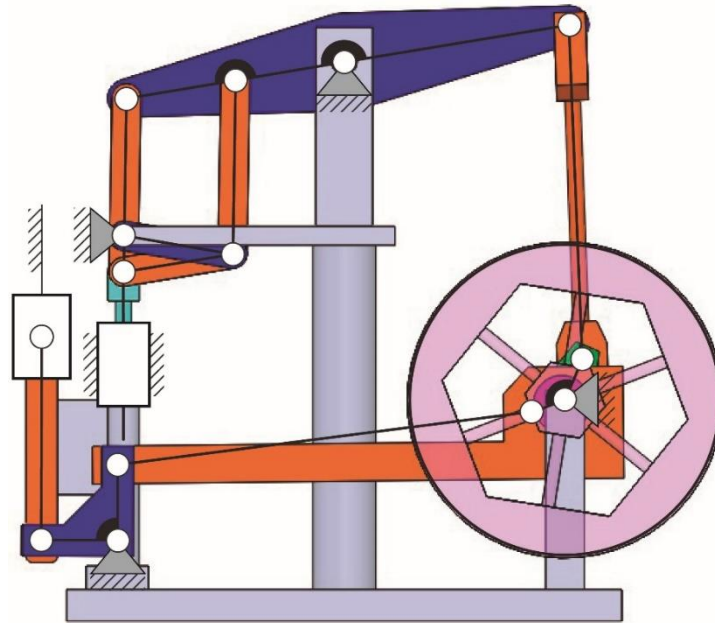
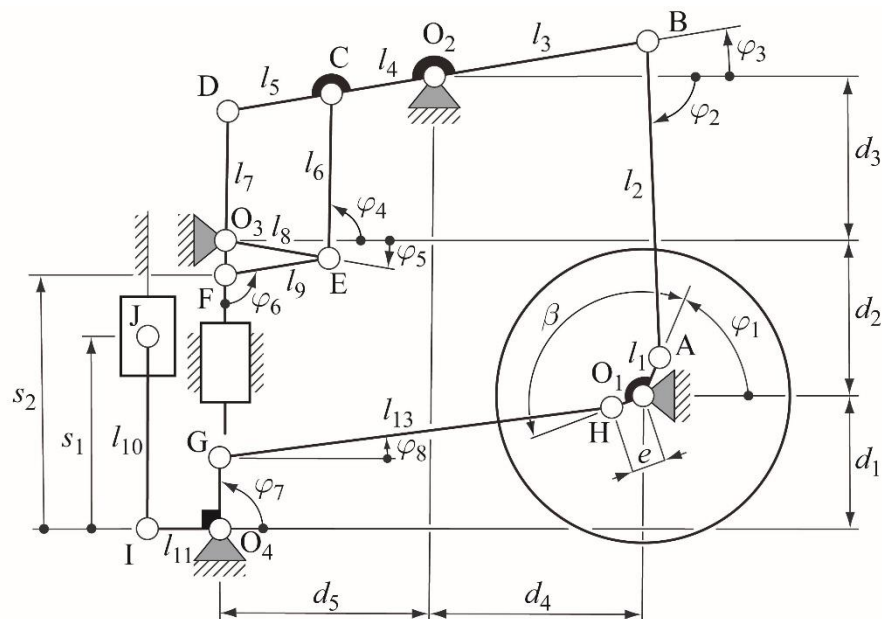


Figura 5.30 Vista en alzado con esquema de símbolos superpuesto en la máquina de vapor de Watt

A continuación, se extrae el esquema y se representa y enriquece en una figura aparte con los parámetros y variables geométricas a tener en cuenta (Figura 5.31).



$l_1 = 14 \text{ mm}$	$l_4 = l_5 = l_8 = l_9 = 35 \text{ mm}$	$l_{11} = l_{12} = 24 \text{ mm}$	$d_1 = 44,53 \text{ mm}$	$d_4 = d_5 = 70 \text{ mm}$
$l_2 = 106 \text{ mm}$	$l_6 = l_7 = 55 \text{ mm}$	$l_{13} = 142,11 \text{ mm}$	$d_2 = 51,99 \text{ mm}$	$e = 1,61 \text{ mm}$
$l_3 = 72,5 \text{ mm}$	$l_{10} = 64 \text{ mm}$		$d_3 = 55,01 \text{ mm}$	$\beta = 161,85^\circ$

Figura 5.31 Esquema de símbolos con variables y parámetros de la máquina de vapor de Watt

A partir del esquema de símbolos (Figura 5.31), se procede a explicar su funcionamiento en detalle, el cual es: La oscilación vertical de la corredera que es impulsada por el vapor (punto F) provoca el movimiento del cuadrilátero articulado FECD, lo cual provocará el movimiento del balancín DCO₂B entorno al punto O₂. El otro extremo del balancín se articula la biela BA, ésta acciona a la manivela AO₁ que girará en torno a la articulación O₁. Cuando gire el eje O₁, también lo hará la rueda excéntrica con centro en H y también el volante de inercia. La excéntrica está unida a través de la biela HG que articulada al balancín GO₄I, lo acciona y éste se balancea entorno a O₄. Por último, el balancín acciona a la biela IJ que hace que la válvula J se desplace verticalmente de manera alternativa.

El vector de coordenadas generalizadas que se utilizará para el estudio este mecanismo es el siguiente: $q = \{\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5, \varphi_6, \varphi_7, \varphi_8, s_1, s_2\}^t$. Por inspección directa el mecanismo tiene 1 grado de libertad, a continuación, se aplica el criterio de Grübler-Kutzbach para comprobar si el mecanismo presenta redundancias totales (ecuación 14).

$$\begin{aligned} \text{gdl} &= 12 \text{ sólidos móviles} \times 3 \text{ gdl/sólido} - 16 \text{ artic.} \times 2 \text{ gdl/artic.} - 2 \text{ prismáticos} \times 2 \text{ gdl/prism.} \\ &= 0 \text{ gdl} \end{aligned} \quad (14)$$

A partir de la ecuación 4 se obtiene que el mecanismo presenta una redundancia; ésta puede estar causada por la presencia de la barra O₃E.

Estudiado y comprendido el funcionamiento del mecanismo y realizado su modelo 3D y esquema de símbolos, se pasa a animar y renderizar el mecanismo.

El último paso es el de realizar un estudio cinemático (Figura 5.32), en este caso la variable independiente será el ángulo de giro φ_1 del volante de inercia y las variables dependientes serán los desplazamientos verticales de los puntos J (válvula): s_1 y del punto F (pistón): s_2 .

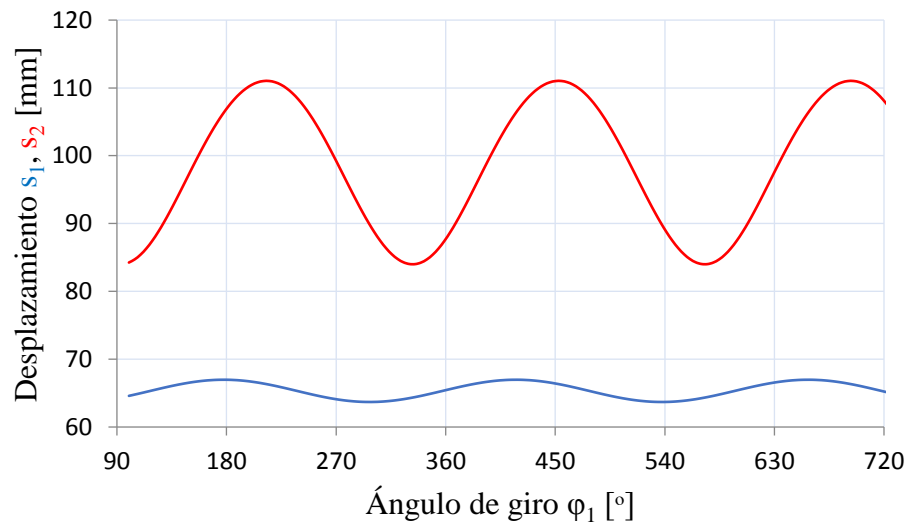


Figura 5.32 Gráfico que relaciona el ángulo de giro del volante de inercia (φ_1) vs el desplazamiento vertical de la válvula (s_1) y del pistón (s_2)

En el gráfico se observa como la oscilación vertical de la válvula es mucho más sutil que la del pistón de la cámara vecina.

Los valores obtenidos en el gráfico son coherentes con los desplazamientos medidos en el mecanismo real con un pie de rey, por lo tanto, se demuestra la idoneidad de este modelo virtual para el estudio.

5.2.3. Maqueta de Motor Stirling

El sexto mecanismo estudiado es el de la maqueta de un motor de Stirling (Figura 5.33), inventado a principios del siglo XIX por Robert Stirling con la intención de poder competir con el motor de vapor. Los hay de tres tipos según su configuración: a) Tipo Alfa, b) Tipo Beta y c) Tipo Gamma. En este caso el estudio se basa en la maqueta de un motor de Stirling de tipo Beta, en el que los dos pistones (el de potencia y el de desplazamiento) se encuentran en un mismo cilindro.

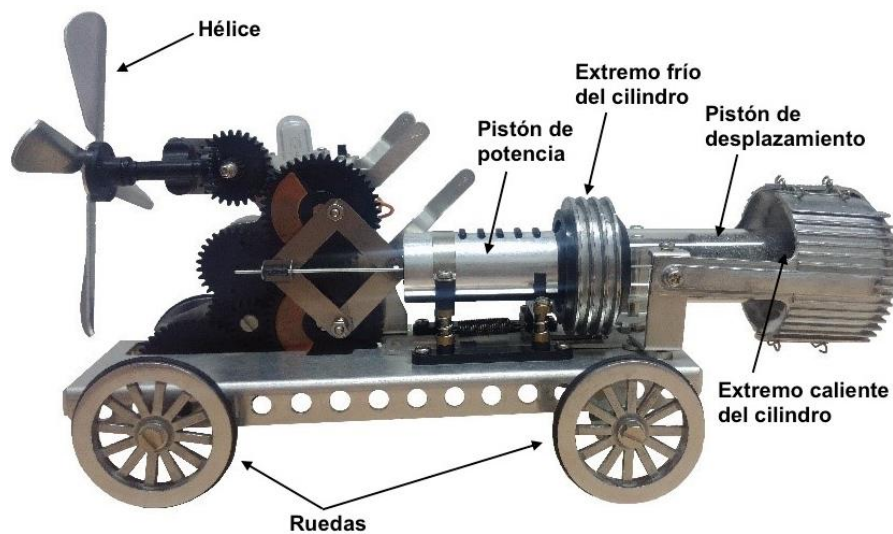


Figura 5.33 Fotografía del motor de Stirling

El cilindro consta de un lado “frío” y otro “caliente”, dentro de este cilindro hay dos pistones; el pistón de potencia ocupa toda la sección del cilindro, el pistón de desplazamiento tiene un margen de holgura respecto al cilindro de forma que el aire pueda pasar a su alrededor (Figura 5.33).

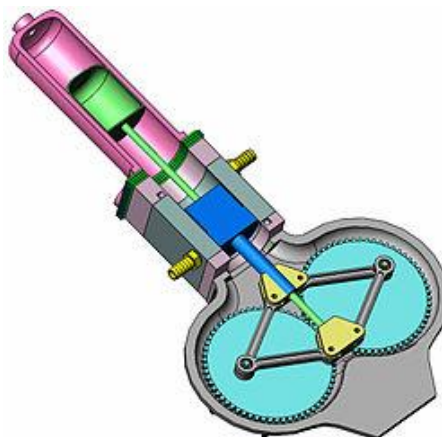


Figura 5.34 Sección de un modelo virtual de un motor Stirling tipo Beta.

Se calienta el extremo caliente del cilindro (lado rosado) (Figura 5.34), eso provoca que el aire al calentarse en su interior se expanda y empuje el cilindro de potencia (cilindro azul) hacia la izquierda, a través de un cuadrilátero articulado y engranajes el movimiento se transmite al pistón de desplazamiento (de color verde), que se desplazará hacia el lado caliente. Cuando esto ocurra el aire se desplaza por el contorno del pistón de desplazamiento hacia el lado contrario, en el que se enfriará debido a la presencia de las aletas disipadoras de calor (zona gris). Este enfriamiento del aire causa una compresión (contracción) del mismo, y por tanto el pistón de potencia se moverá hacia la izquierda. De nuevo a través del cuadrilátero articulado y engranajes el movimiento se transmite al pistón de desplazamiento que se colocará en la izquierda, desplazando el aire frío hacia el extremo caliente, donde volverá a ganar temperatura y de nuevo empezará el ciclo.

Todo este sistema de pistones desencadena, a través de un tren de engranajes, la rotación de la hélice y ruedas delanteras. El mecanismo tiene un grado de libertad

Una vez analizado el funcionamiento general del mecanismo, identificados y medidos cada uno de sus elementos, se procede a crear el modelo 3D (Figura 5.35), utilizando el código de colores previamente mencionado en el subapartado 4.2.2.

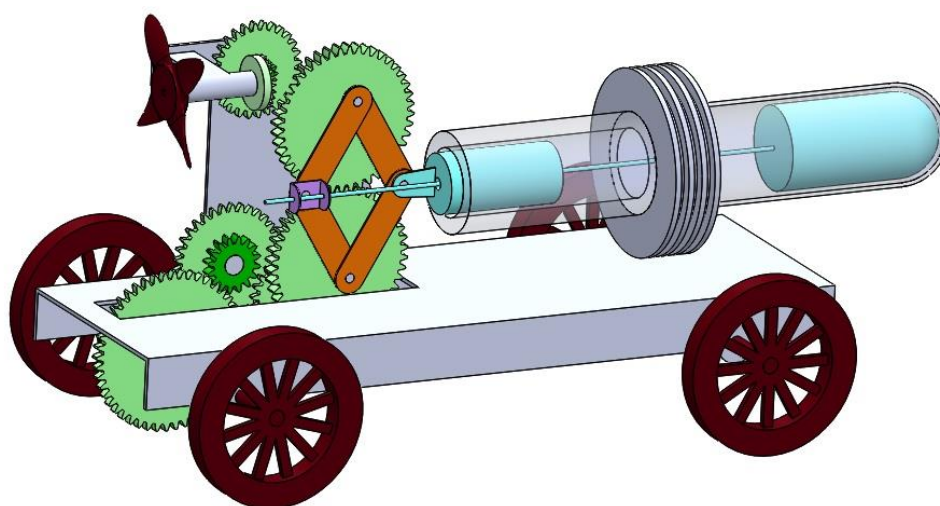


Figura 5.35 Modelo virtual en 3D del motor de Stirling

Seguidamente, se presenta la vista en alzado del modelo 3D y en el mismo alzado se identifican y superponen los pares cinemáticos y elementos que forman el mecanismo (Figuras 5.36 y 5.37 respectivamente)

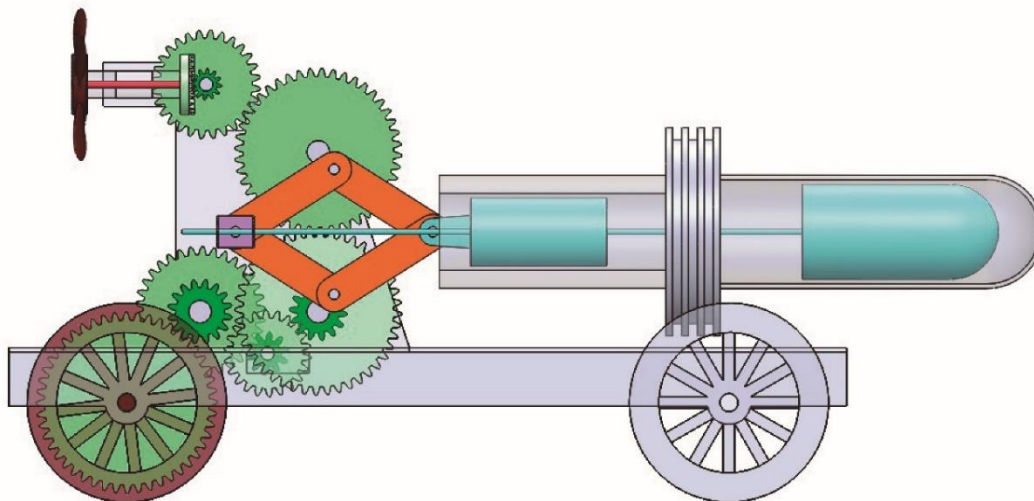


Figura 5.36 Vista en alzado del motor de Stirling

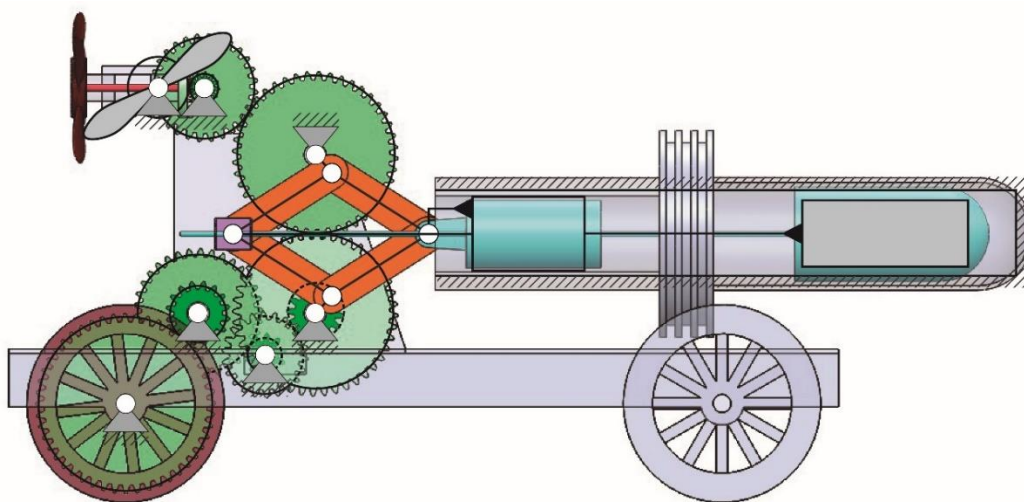
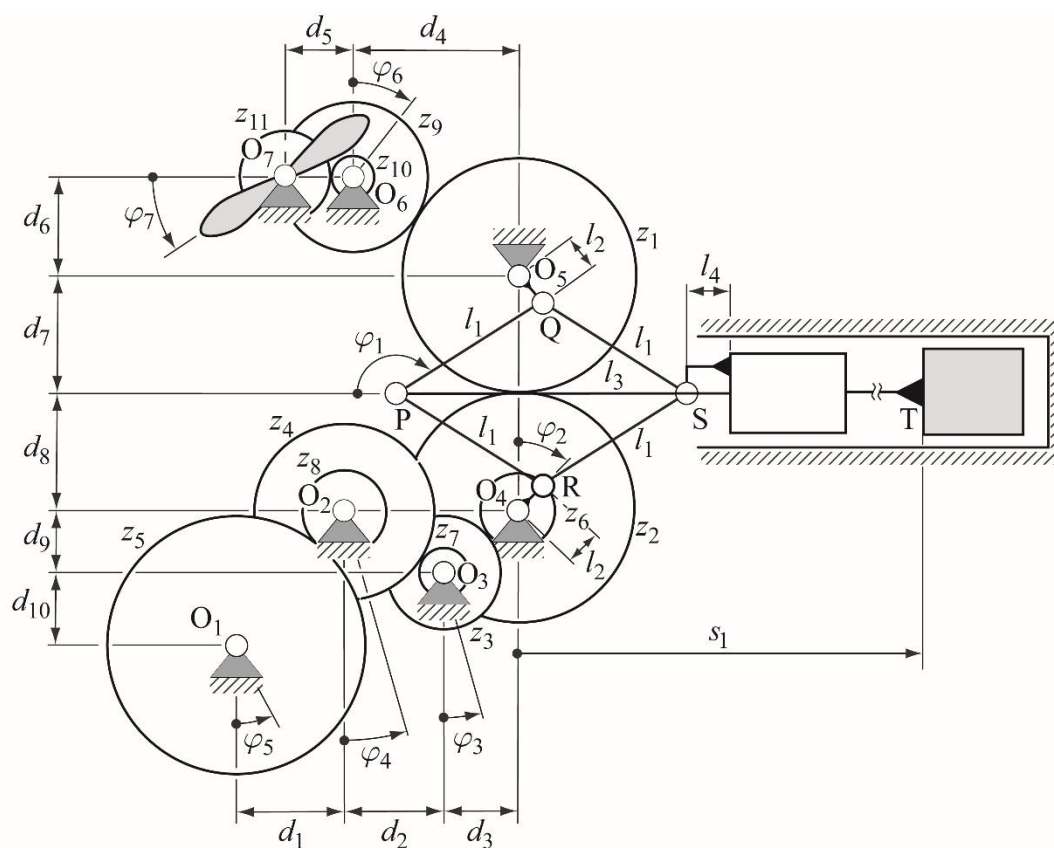


Figura 5.37 Vista en alzado con esquema de símbolos superpuesto en el motor de Stirling

A continuación, se extrae el esquema y se representa y enriquece en una figura aparte con los parámetros y variables geométricas a tener en cuenta (Figura 5.38).



$l_1 = 25,8 \text{ mm}$	$d_1 = 16,18 \text{ mm}$	$d_5 = 4,75 \text{ mm}$	$d_{10} = 10,85 \text{ mm}$	$z_8 = 16$	
$l_2 = 5,2 \text{ mm}$	$d_2 = 14,90 \text{ mm}$	$d_6 = 14,89 \text{ mm}$	$z_1 = z_2 = 44$	$z_5 = 48$	$z_9 = 28$
$l_3 = 125,2 \text{ mm}$	$d_3 = 11,20 \text{ mm}$	$d_7 = d_8 = 17,7 \text{ mm}$	$z_3 = 22$	$z_6 = 14$	$z_{10} = 12$
$l_4 = 8,4 \text{ mm}$	$d_4 = 24,77 \text{ mm}$	$d_9 = 9,21 \text{ mm}$	$z_4 = 34$	$z_7 = 10$	$z_{11} = 24$

5.38 Esquema de símbolos con variables y parámetros del motor de Stirling

En el caso del motor de Stirling es necesario calcular dos relaciones de transmisión (Figura 5.38), la que corresponde a la transmisión de movimiento desde la rueda de z_1 dientes la hélice y la que corresponde a la transmisión de movimiento desde la rueda de z_2 dientes hasta la rotación de las ruedas motrices solidarias al eje de la rueda de z_5 dientes.

- Relación de transmisión que hay entre la rueda dentada de entrada (la de z_1 dientes) con la rueda dentada de salida solidaria a la hélice (de z_{11} dientes):

- Relación de transmisión entre z_1 y z_9 : $\tau_1 = \frac{z_1}{z_9} = \frac{44}{28} = 1,57$ (15)

- Relación de transmisión entre z_{10} y z_{11} : $\tau_2 = \frac{z_{10}}{z_{11}} = \frac{12}{24} = 0,5$ (16)

Por lo tanto, la relación de transmisión global entre la rueda de z_1 dientes y la hélice es²:

$$\tau_{hélice} = \tau_1 * \tau_2 = 0,79 \quad (17)$$

- Relación de transmisión que hay entre la rueda dentada de entrada (la de z_2 dientes) con la rueda dentada de salida solidaria al eje de las ruedas (la de z_5 dientes):

- Relación de transmisión entre z_6 y z_3 : $\tau_3 = \frac{z_6}{z_3} = \frac{14}{22} = 0,63$ (18)

- Relación de transmisión entre z_7 y z_4 : $\tau_4 = \frac{z_7}{z_4} = \frac{10}{34} = 0,29$ (19)

- Relación de transmisión entre z_8 y z_5 : $\tau_5 = \frac{z_8}{z_5} = \frac{16}{48} = 0,33$ (20)

Por lo tanto, la relación de transmisión total entre la rueda de z_2 dientes y las ruedas es³:

$$\tau_{ruedas} = \tau_3 * \tau_4 * \tau_5 = 0,06 \quad (21)$$

A partir del esquema, se describe su funcionamiento detallado: El calor aplicado en un extremo del cilindro hace que la articulación S contenida en el pistón de potencia se desplace. La articulación S forma parte del cuadrilátero articulado SPQR y lo acciona, por lo tanto, las articulaciones Q y R que también están contenidas en las ruedas de z_1 y z_5 dientes las hacen rotar entorno a O_5 en sentido antihorario y entorno a O_4 en sentido

² Son solidarias las ruedas de dientes z_9 y z_{10}

³ Son solidarias entre sí las ruedas de dientes: z_2 y z_6 , z_3 y z_7 , z_4 y z_8

horario, respectivamente; esto provocará que la articulación múltiple P se mueva, y al ser solidaria al pistón de desplazamiento, éste también cambia su posición. La articulación Q es solidaria a la rueda de z_1 dientes, la cual engrana con la rueda de z_9 dientes, que a su vez es solidaria al piñón de z_{10} dientes. Este piñón engrana con la corona dentada de z_{11} dientes, que es solidaria a la hélice a través de un eje transmitiéndole rotación. Por la parte inferior de la línea trazada a través de las articulaciones P y S, el engranaje de z_2 dientes es solidario al piñón de z_6 dientes. Este piñón transmite la rotación al engranaje de z_3 dientes, que también es solidario a un piñón de z_7 dientes. Este piñón engrana con la rueda dentada de z_4 dientes que, de nuevo, es solidaria al piñón de z_8 dientes. Éste último piñón transmite el movimiento al engranaje de z_5 dientes, que es solidario a un eje (O_1) y éste a las ruedas, las cuales rotarán a la velocidad angular ϕ_5 .

El vector de coordenadas generalizadas que se utilizará para el estudio este mecanismo es el siguiente: $q = \{\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4, \phi_5, \phi_6, s_1\}^t$. Por inspección directa el mecanismo tiene un grado de libertad, a continuación, se aplica el criterio de Grübler-Kutzbach para comprobar si el mecanismo presenta redundancias totales (ecuación 22).

$$\text{gdl} = 13 \text{ sólidos móviles} \times 3 \text{ gdl/solido} - 15 \text{ artic} \times 2 \text{ gdl/artic.} - 2 \text{ prism.} \times 2 \text{ gdl/prism} - 6 \text{ transmisiones} \times 1 \text{ gdl/transm} = -1 \text{ gdl} \quad (22)$$

A partir de la ecuación 4 se obtiene que la maquina presenta dos redundancias, éstas son debidas a la presencia de la barra articulada PR y a la transmisión dentada entre los engranajes de z_1 y z_2 dientes.

Estudiado y comprendido el funcionamiento del mecanismo, realizado su modelo 3D y su esquema de símbolos, se pasa a animar y renderizar el mecanismo.

El último paso es el de realizar un estudio cinemático, en éste se elaboran dos gráficos (Figuras 5.39 y 5.40). Para ambos la variable independiente será el desplazamiento horizontal s_1 del pistón de potencia (pistón con articulación S). En un gráfico la variable dependiente será el desplazamiento angular ϕ_5 de las ruedas motrices. En el segundo gráfico la variable dependiente será el desplazamiento angular ϕ_7 de la hélice.

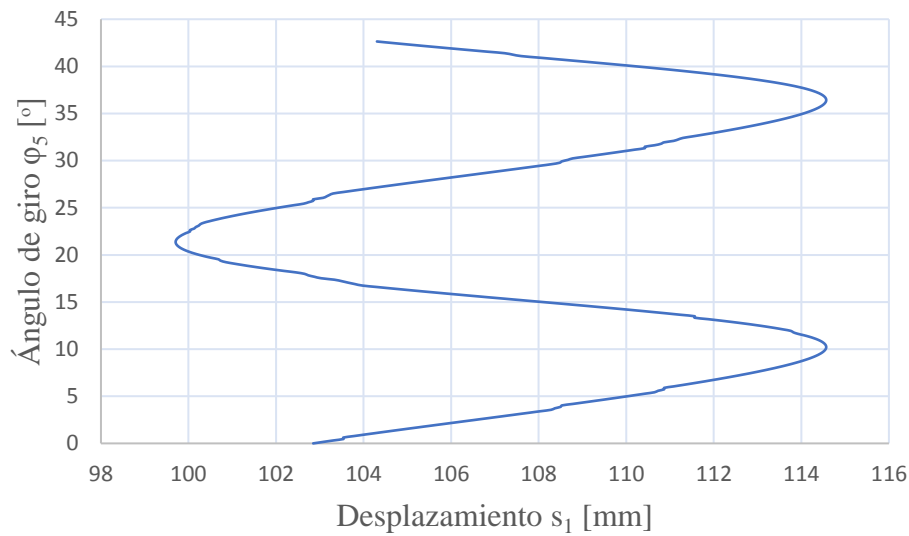


Figura 5.39 Gráfico que relaciona el desplazamiento horizontal del pistón de potencia (s_1) vs el desplazamiento angular de las ruedas motrices (φ_5)

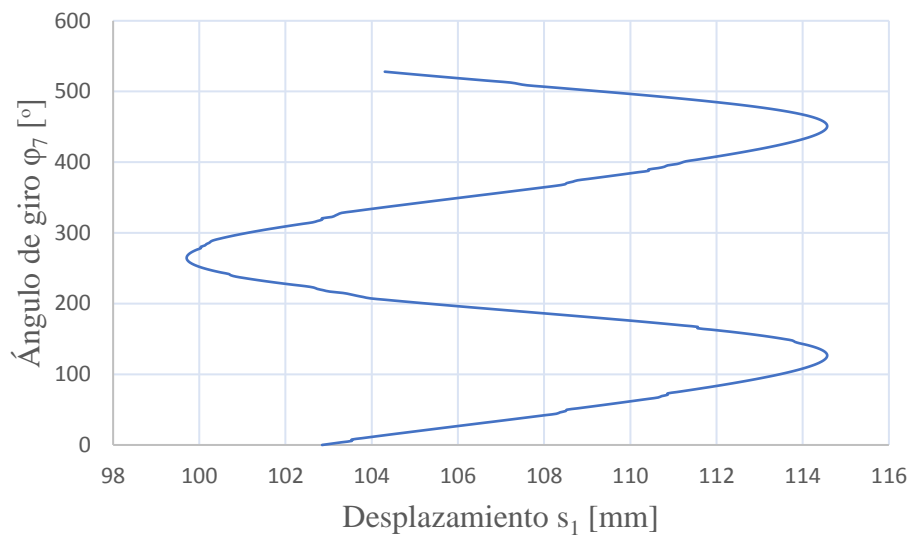


Figura 5.40 Gráfico que relaciona el desplazamiento horizontal del pistón de potencia (s_1) vs el desplazamiento angular de la hélice (φ_7)

Comparando los dos gráficos se constata lo que ya se podía ver tanto en la maqueta real como en la virtual: la hélice gira a una velocidad mucho más elevada que la rueda para un mismo desplazamiento del pistón de potencia.

Los valores obtenidos en el gráfico son coherentes con los desplazamientos medidos en el mecanismo real con un pie de rey, por lo tanto, se demuestra la idoneidad de este modelo virtual para el estudio.

5.2.4. Mecanismo de distribución de Stephenson

El séptimo y último mecanismo que se analiza es el mecanismo de distribución de Stephenson (Figura 5.41), implementado en una gran variedad de motores de vapor e inventado a mediados del siglo XIX. El nombre proviene de Robert Stephenson, a pesar de haber sido desarrollado por uno de sus empleados. [14]

La manera en la que se origina el movimiento es según el mismo principio que la máquina de vapor de Watt (explicada en el subapartado 5.2.2.). La entrada de vapor caliente y la salida de vapor frío provocan fenómenos de expansión y compresión que a su vez provocan el movimiento del pistón. A través de una barra el movimiento llega hasta un doble cuadrilátero articulado, que en su parte superior hace rotar a dos ruedas excéntricas. A través de unas barras, balancín y guía, el movimiento se transmite de nuevo a la válvula. En la parte superior se puede ajustar la marcha de la máquina para que vaya hacia delante o hacia detrás con mayor o menor velocidad.

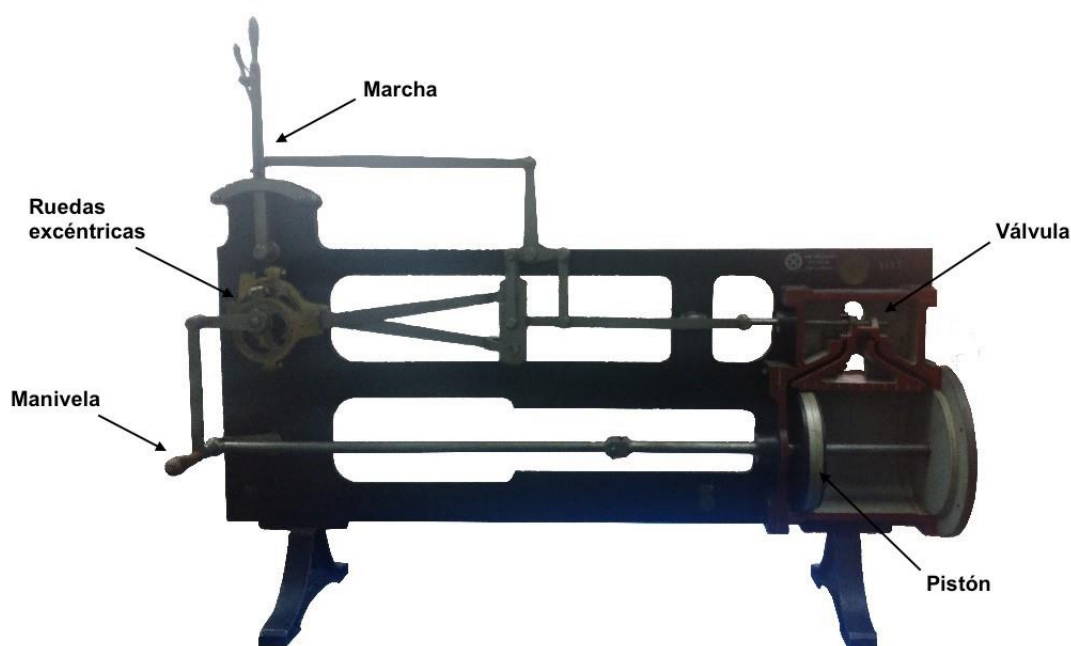


Figura 5.41 Fotografía del Mecanismo de Distribución de Stephenson

Una vez analizado el funcionamiento general del mecanismo, identificados y medidos cada uno de sus elementos, se procede a crear el modelo 3D (Figura 5.42), con el código de colores previamente mencionado en el subapartado 4.2.2.

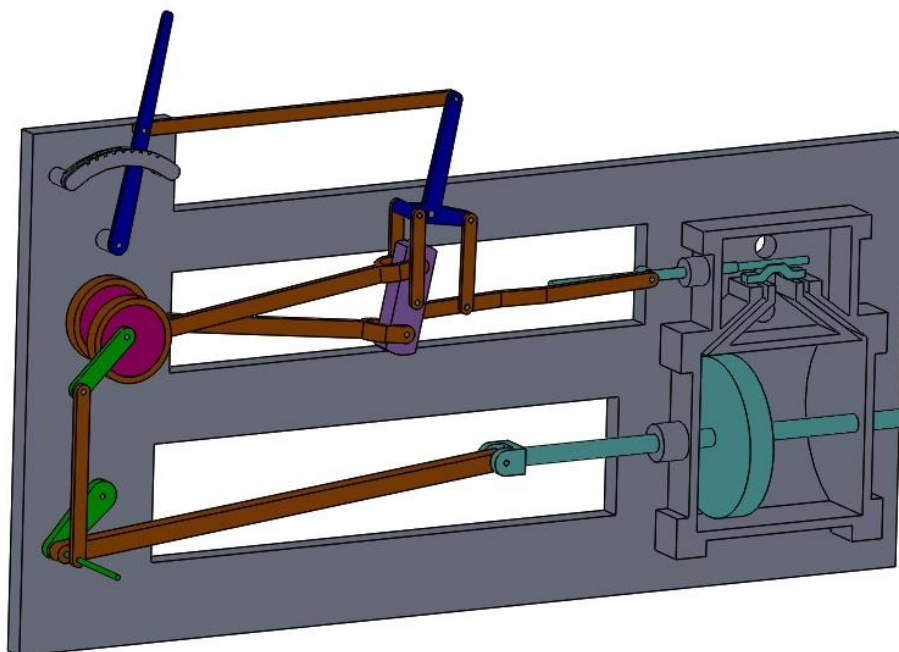


Figura 5.42 Modelo virtual en 3D del mecanismo de distribución de Stephenson

Seguidamente, se presenta la vista en alzado del modelo 3D y en el mismo alzado se identifican y superponen los pares cinemáticos y elementos que forman el mecanismo (Figuras 5.43 y 5.44, respectivamente).

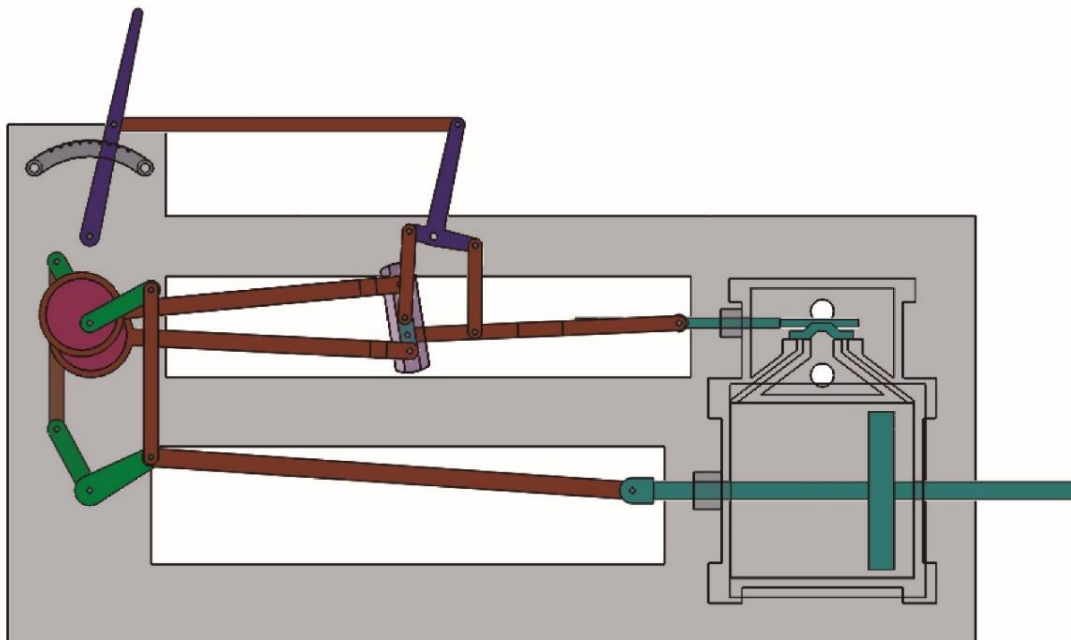


Figura 5.43 Vista en alzado del mecanismo de distribución Stephenson

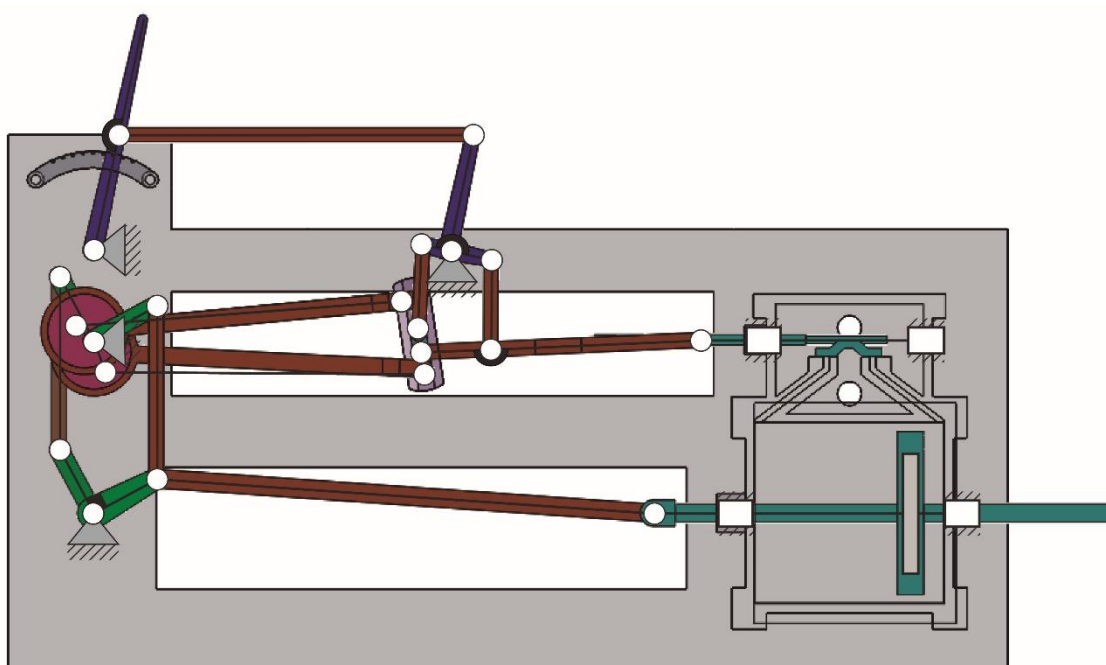


Figura 5.44 Vista en alzado con esquema de símbolos superpuesto en el mecanismo de distribución de Stephenson

A continuación, se extrae el esquema y se representa y enriquece en una figura aparte con los parámetros y variables geométricas a tener en cuenta (Figura 5.45).

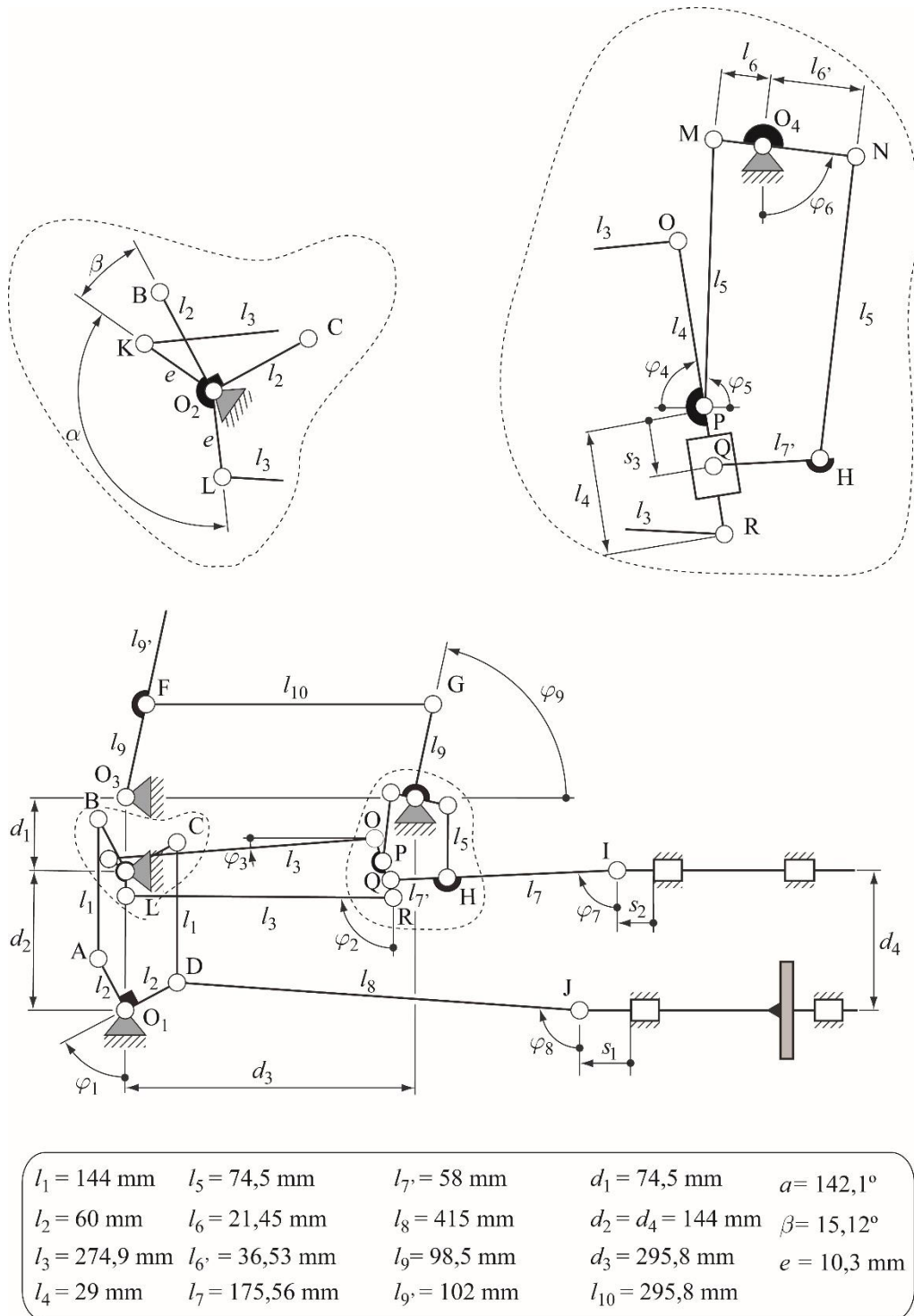


Figura 5.45 Esquema de símbolos con variables y parámetros del mecanismo de distribución de Stephenson

A partir del esquema se puede explicar y entender mejor su funcionamiento: la entrada y salida de vapor hace que el punto J articulado al extremo de la barra es la que es solidario el pistón de potencia oscile de derecha a izquierda. Este movimiento provoca que el otro extremo de la biela JD, es decir el punto D articulado con la doble manivela DO₁A, la haga girar alrededor de la articulación O₁ (eje común de las dos manivelas), La rotación de este eje produce el movimiento de los cuadriláteros articulados O₁DCO₂ y O₁ABO₂. Al rotar la manivela múltiple de extremos articulados BCKL entorno al eje O₂, éste también rota. Las articulaciones L y K surgen de sustituir los centros geométricos de las dos ruedas excéntricas del mecanismo real, conectadas a través de barras a la guía articulada por los puntos R y O, respectivamente. En la guía articulada se producirá un balanceo que hará que la corredera Q se desplace por dentro de la guía. El movimiento de Q hace que el otro extremo de la biela QHI, la articulación I oscile de un lado a otro en la horizontal, lo cual causará el movimiento de la válvula de distribución de vapor.

En la parte superior del mecanismo, se elige la marcha de la máquina de vapor a partir de una palanca O₃F, que forma parte de un cuadrilátero articulado O₃FGO₄; por lo tanto, una vez se ha establecido una marcha, este cuadrilátero queda fijado. La articulación O₄ fija forma parte de un balancín con extremos en N y M, que queda orientado según la posición de la palanca O₃F. estos puntos están unidos a la barra QI por el punto H y a la guía articulada por el punto P mediante barras.

El vector de coordenadas generalizadas que se utilizará para el estudio este mecanismo es el siguiente: $q = \{\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5, \varphi_6, \varphi_7, \varphi_8, \varphi_9, s_1, s_2\}^t$. Por inspección directa el mecanismo tiene 1 grado de libertad, a continuación, se aplica el criterio de Grübler-Kutzbach para comprobar si el mecanismo presenta redundancias totales (ecuación 23).

$$\text{gdl} = 14 \text{ sólidos móviles} \times 3 \text{ gdl/sólido} - 18 \text{ articulaciones} \times 2 \text{ gdl/artic.} - 3 \text{ prismáticos} \times 3 \text{ gdl/prism.} = 0 \text{ gdl} \quad (23)$$

A partir de la ecuación 4, se obtiene que el mecanismo presenta una redundancia; ésta es debida a la presencia de la barra AB (o la barra CD).

Estudiado y comprendido el funcionamiento del mecanismo y realizado su modelo 3D y esquema de símbolos, se pasa a animar y renderizar el mecanismo.

El último paso es el de realizar un estudio cinemático, en este caso la variable independiente será el ángulo de giro φ_1 de la manivela (a su vez de la barra O₁D). Las variables dependientes serán los desplazamientos s_2 de la válvula y pistón s_1 en el eje de las X respectivamente (Figura 5.46).

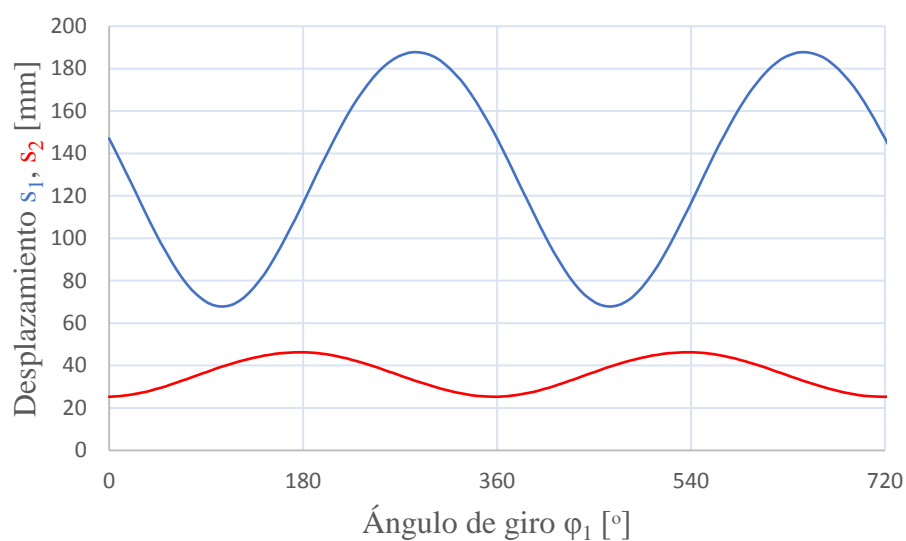


Figura 5.46 Gráfico que relaciona el ángulo de giro de la manivela (ϕ_1) vs los desplazamientos horizontales del pistón (s_1) y de la válvula (s_2).

Los resultados obtenidos son muy similares a los del Mecanismo Rápido de Whitworth; el desplazamiento de la válvula (s_2) es reducido, mientras que el desplazamiento del pistón, s_1 , es mucho mayor.

Los valores obtenidos en el gráfico son coherentes con los desplazamientos medidos en el mecanismo real con una regla metálica, por lo tanto, se demuestra la idoneidad de este modelo virtual para el estudio.

6. Mecanismo fabricado por impresión 3D

Como se ha explicado previamente en el apartado 4.5, hubo que modificar las piezas diseñadas previamente para el mecanismo de retorno rápido. A continuación, se muestra el ejemplo de la manivela con pares superiores (pieza amarilla) y los ajustes que se tuvieron que realizar hasta obtener la pieza final fabricada en impresora 3D. En la Figura 6.1 se puede apreciar como en el pivote se añadieron avellanados para poder añadir un tornillo con su respectiva tuerca, para aumentar la resistencia y rigidez de la pieza. También se añadieron redondeos, chaflanes, etc., para facilitar la impresión de la pieza en la medida de lo posible.

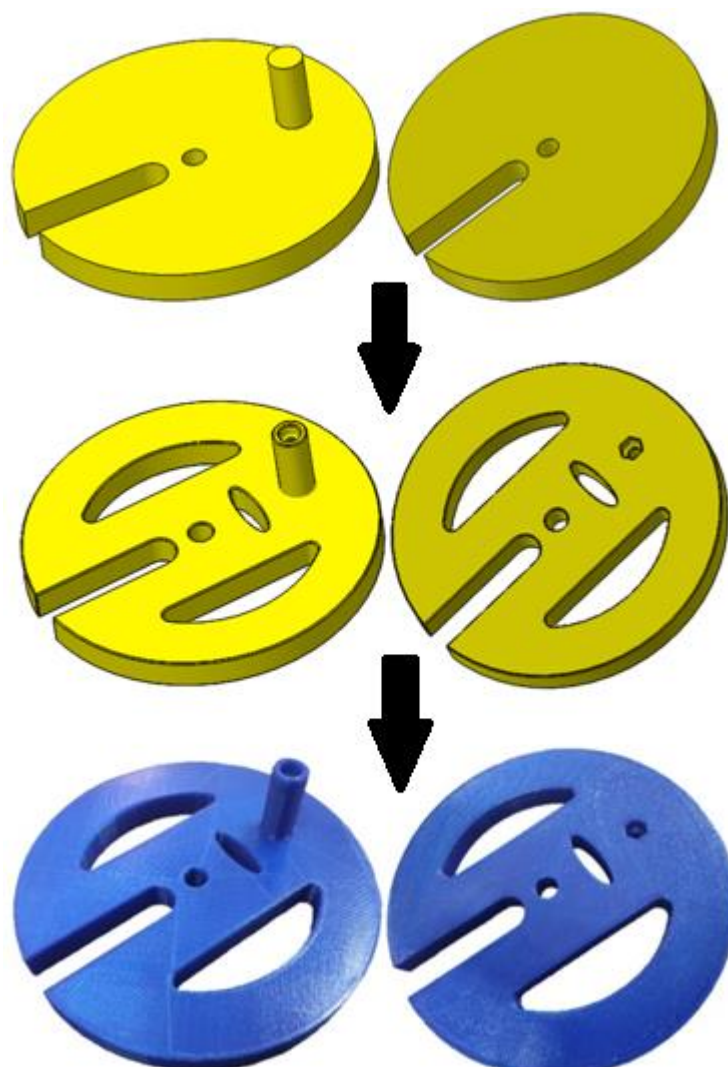


Figura 6.1 De arriba a abajo: pieza inicialmente diseñada, pieza diseñada para la impresión 3D, pieza real impresa

En relación con el ensamblaje, se utilizó el método de ensayo y error, haciendo los cambios pertinentes cuando fuera necesario. Un ejemplo es el de la rueda dentada pequeña (piñón verde intenso), la cual fue colocada sobre la rueda dentada más grande, de manera que la relación de transmisión entre ambos engranajes sigue siendo la misma y el mecanismo continúa cumpliendo su función de manera correcta. Este cambio facilita la hipotética posterior inclusión de un motor en la parte trasera de la bancada y también otorga al mecanismo una simetría en la distribución de los elementos alrededor del eje vertical que contiene las articulaciones de las ruedas (Figura 6.2).

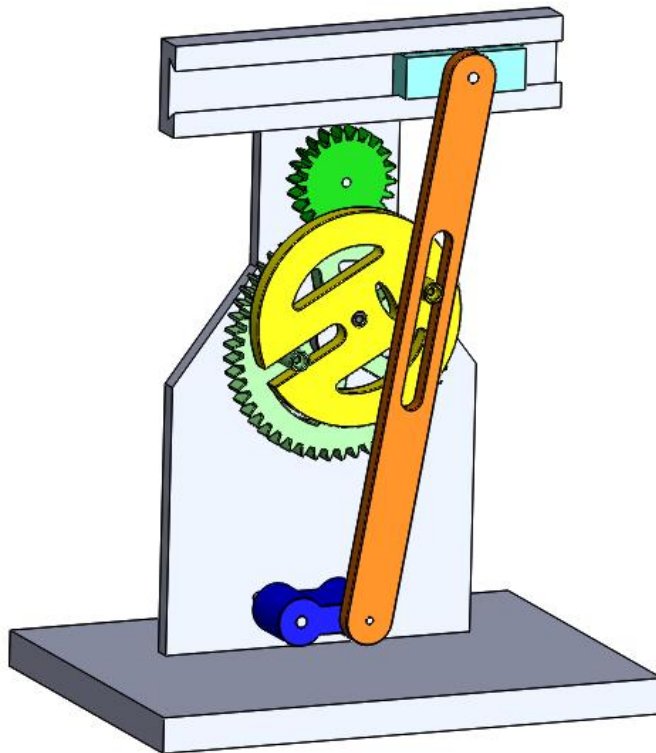


Figura 6.2 Mecanismo de Retorno Rápido diseñado para ser fabricado

Tras el diseño, impresión y fabricación de todas las piezas y la inclusión de articulaciones, el resultado final es el de la Figura 6.3



Figura 6.3 Maqueta física del Mecanismo de Retorno Rápido, construida con piezas de plástico en color obtenidas por impresión 3D y otras en madera

7. Costes del proyecto

En este apartado se estima el coste total que ha conllevado el desarrollo de este proyecto. Este coste total está desglosado en costes de equipos, licencias de software y tiempo dedicado por parte del estudiante.

El proyecto se ha desarrollado a lo largo de 8 meses y el coste ha sido de 14509,3 €

7.1. Tipos de gastos

7.1.1. Coste de personal

El proyecto ha sido desarrollado por una sola persona. El Trabajo de Fin de Grado tiene asociados 12 créditos; se asocian 25 horas por crédito por lo tanto deberían dedicarse al proyecto un total de 300 horas. Realmente las horas invertidas han sido más, se calcula que se han necesitado 560 horas. El sueldo de un ingeniero es de 15 €/h.

En la siguiente tabla se muestra el tiempo invertido en las diferentes tareas comprendidas en el proyecto.

Tareas	Tiempo invertido en horas
Estudio estructural, caracterización, estudio geométrico y cinemático	100
Modelación en 3D	200
Animación en 3D	70
Fabricación maqueta física con impresora 3D	20
Documentación	90
Redacción	80
Total	560

Tabla 7.1 Tiempo invertido en las diferentes tareas que conforman el proyecto

Por lo tanto, el coste total de mano de obra para desarrollar el Trabajo Final de Grado ha sido de:

$$\text{Coste mano de obra} = 560 \text{ horas} * \frac{15\text{€}}{\text{hora}} = 8.400\text{€} \quad (24)$$

7.1.2. Coste de material

El coste de material total destinado para el presente proyecto se divide en dos apartados: material inventariable y material fungible

- **Material inventariable:** bienes que no se agotan con su uso, con una vida superior a un año y con un precio superior a 150 €.

Para poder trabajar con todos los programas utilizados es necesario un ordenador. Se ha utilizado un portátil HP de un coste aproximado de 1000 € y un portátil Macintosh para el resto de etapas del trabajo, de un coste de 1900 €. Los ordenadores han sido utilizados durante 8 meses y se considera que su vida útil es de unos 5 años; a partir de ese dato se calculan los costes:

$$\text{Porcentaje de vida del ordenador/macintosh} = \frac{8 \text{ meses}}{5 \text{ años} * \frac{12 \text{ meses}}{\text{año}}} * 100 = 13,33\% \quad (25)$$

$$\text{Coste de uso del ordenador} = 0,133 * 1000 \text{ €} = 133,33 \text{ €} \quad (26)$$

$$\text{Coste de uso del macintosh} = 0,133 * 1900 \text{ €} = 253,33 \text{ €} \quad (27)$$

- **Material fungible:** El material fungible engloba los bienes que se gastan con el uso; en este caso es el material de oficina: material de escritura, impresiones, portapapeles, plástico utilizado para la impresión 3D, madera utilizada para la fabricación de la maqueta física, etc. En este proyecto han sido utilizados unos 500 gramos de plástico para la fabricación de piezas en la impresora 3D (lo cual tiene un coste de unos 20€). Este material ha sido tasado en aproximadamente 50 €.

- **Software informático:** En este proyecto se han utilizado bastantes programas informáticos privados, en la siguiente tabla se calcula el coste de uso de estos programas:

Software/ S.O	Precio Mensual	Precio para 8 meses
Microsoft Office	8,25 €/mes	66
SolidWorks 2018	550 €/mes	4400
Adobe Illustrator	60,49 €/mes	483,92
Photoshop CS6	50,34 €/mes	402,72
Total		5352,64

Tabla 7.2 Coste del software informático utilizado

- **Conexión a internet:** Para el desarrollo del proyecto se ha precisado de una conexión a internet para consultar información, descargar y enviar archivos y software, etc.

El precio de una tarifa de internet con fibra óptica (300mb/s) es de unos 40€ al mes, por lo tanto, el precio total durante los 8 meses ha sido de 320€.

7.2. Resumen de costes

El presupuesto total destinado al presente trabajo ha sido de 14509,3 €

8. Conclusiones

Tras la finalización del presente proyecto, se puede afirmar que se ha conseguido el objetivo principal trazado al inicio del proyecto ya que se han creado los modelos virtuales tridimensionales para los 7 artefactos elegidos, la animación de su funcionamiento, y se ha aportado la maqueta física de uno de ellos de nombre Mecanismo de Retorno Rápido fabricada por impresión 3D. El material creado en este proyecto puede ser utilizado como material didáctico para la enseñanza y el aprendizaje de la materia Teoría de Máquinas y Mecanismos (TMM).

Para alcanzar el objetivo principal del proyecto, se establecieron una serie de objetivos específicos que también han sido cumplidos y que se comentan a continuación:

- Se ha realizado el estado del arte actual respecto al uso de recursos virtuales en la enseñanza de la asignatura TMM en otras universidades.
- Se ha propuesto y aplicado un procedimiento para la selección, modelación, simulación y fabricación de los mecanismos estudiados.
- Se ha realizado el análisis geométrico y cinemático de los mecanismos estudiados, aportando los esquemas de símbolos normalizados de dichos mecanismos, la determinación de sus grados de libertad y el análisis de la existencia de redundancias. Se exponen gráficos cinemáticos obtenidos mediante el módulo Motion, del programa CAD SolidWorks versión 2018.
- Se han creado los modelos virtuales tridimensionales de los mecanismos seleccionados y los videos que muestran la simulación de su funcionamiento. Se ha creado una maqueta real de uno de los mecanismos elegidos utilizando la fabricación aditiva, en particular la tecnología de impresión 3D por filamento fundido.

Los recursos aportados en el presente trabajo podrán ser utilizados en la impartición de la materia TMM por parte del profesorado; también podría ser colocado en acceso abierto en la intranet de la asignatura como recurso para el autoaprendizaje de los estudiantes. Se debe destacar que la maqueta física creada, está actualmente siendo utilizada en la impartición asignatura Proyecto II, que imparte el tutor del presente trabajo final de grado.

En última instancia, el presente proyecto ha sido muy positivo para el autor, el cual ha profundizado en varias materias recibidas durante su formación y en otras nuevas en las que ha requerido investigar. El autor considera que ha incrementado su conocimiento en el ámbito de la ingeniería mecánica, debido al estudio detallado que ha realizado de los artefactos mecánicos elegidos, la profundización en el uso del programa de diseño CAD 3D SolidWorks, más allá de lo que se enseña en la asignatura del grado “Expresión gráfica”. Por último, el estudiante se ha introducido en el mundo de la impresión 3D, que es una tecnología muy actual que no había tenido oportunidad de aprender durante sus estudios en la universidad.

9. Agradecimientos

En este apartado se quiere agradecer especialmente la colaboración de José Luis Tejedo y Jordi Cervantes, del Departamento de Ingeniería Mecánica de la ETSEIB, quienes se encargaron del proceso de la impresión de las piezas en 3D y de la fabricación de las piezas de madera, respectivamente.

También agradecer al director del proyecto, Enrique Zayas, por haberse volcado en el trabajo mucho más allá de lo que normalmente se le exige a un tutor, así como también en la preparación de sus clases como profesor y en su empeño en que sus estudiantes adquieran una buena formación independientemente del número de horas de tiempo personal que tenga que dedicar para llegar a este objetivo.

Por último, un agradecimiento especial a Miguel Ángel Miravé y a Jota Santos, por su inestimable colaboración y soporte moral.

10. Bibliografía

10.1. Referencias bibliográficas

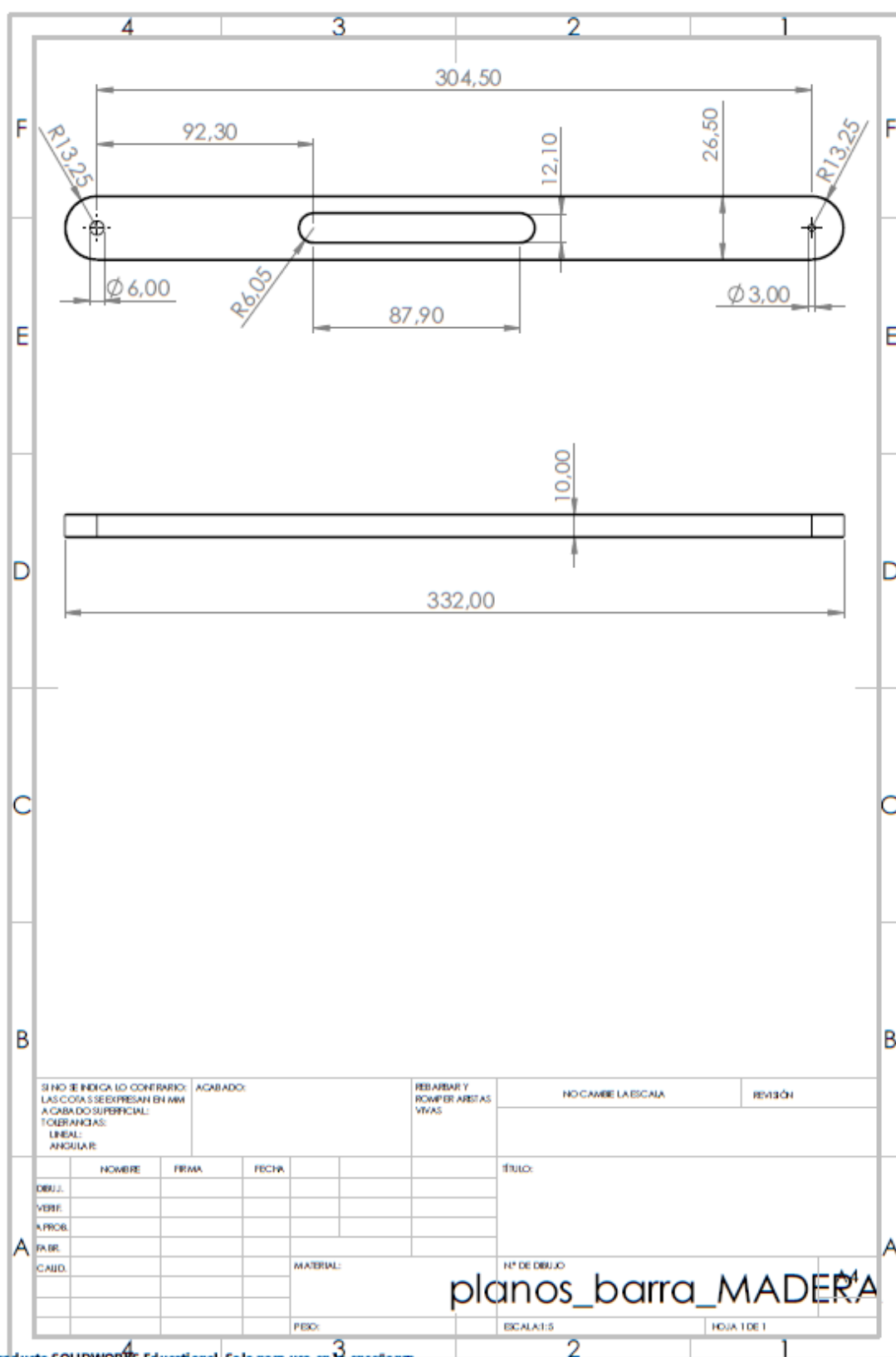
- [1] Merino, D. *Recursos virtuales de apoyo a la enseñanza y aprendizaje de Teoría de Máquinas y Mecanismos*. Trabajo Final de Grado. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). 2018. pp 68.
- [2] Universidad Politécnica de Valencia. Máquinas y Mecanismos – v2019.01
[<http://www.upv.es/vltmodels/04-t8---m3-a4a-1.html>]
- [3] Universidad Carlos III de Madrid. Open Course Ware
[<http://ocw.uc3m.es/ingenieria-mecanica/teoria-de-maquinas/otros-recursos>]
- [4] Universidad de Málaga. Área Ingeniería Mecánica
[<http://immf.uma.es/winmecc.php?PHPSESSID=81b0410d926a7ca24accce23258964f2>]
- [5] Departament d'Enginyeria Mecànica, UPC. PAM
[<https://em.upc.edu/ca/docencia/pagines-docents/etseib-tmm/programa-danalisi-de-mecanismes.-pam>]
- [6] Geogebra. Calculadora gráfica.
[<https://www.geogebra.org/graphing?lang=es>]
- [7] GrabCad Community
[<https://grabcad.com/library/tag/mechanism>]
- [8] Baránov, GG. *Curso de la Teoría de Máquinas y Mecanismos* (Segunda Edición en Castellano). Editorial Mir. Moscú. 1985. pp. 524.
- [9] Dixon & Moe. *Códigos de colores HTML*.
[<https://htmlcolorcodes.com/es/selector-de-color/>]
- [10] ColorHexa. *Color encyclopedia: Information and conversion*.
[<https://www.colorhexa.com/>]
- [11] Norton, Robert L. *Diseño de máquinas (Primera Edición en Castellano)*. Editorial Prentice Hall. México, 1999. pp. 1080.
- [12] Quora. Rushikesh Attarde. *What is Whitworth Quick Return Mechanism*
[<https://www.quora.com/What-is-whitworth-quick-return-mechanism-What-is-that-use>]
- [13] YTEngineer. *Double Acting Steam Engine Animation*
[<https://www.youtube.com/watch?v=YVJsZCU6z1A&list=PL90CW-sgygUao9Vkko4fFixU9hEnf6msq&index=4&t=0s>]
- [14] finebrown13. *Stephenson's Valve Gear in Incredibots(2)*
[<https://www.youtube.com/watch?v=QEOBQvktT7U&list=PL90CW-sgygUao9Vkko4fFixU9hEnf6msq&index=5>]

10.2. Otras Referencias

- [15] Mecanismos. Slideshare.
[<https://es.slideshare.net/Marina676/mecanismos-transmision-61374753>]
- [16] SOLIDWORKS Web Help
[<https://help.solidworks.com/>]
- [17] SolidWorks. *SolidWorks Motion Simulation*.
[<https://www.solidworks.es/sw/products/simulation/solidworks-motion.htm>]
- [18] Draw.io: free online diagram software
[<https://www.draw.io/>]
- [19] SolidWize. *SolidWorks Tutorial: Mechanical Mates by SolidWize*
[https://www.youtube.com/watch?v=Oupme_s5uZg&list=PL90CW-sgygUao9Vkk04fFlxU9hEnf6msq&index=2&t=9s]
- [20] GoEngineer. *SOLIDWORKS - Dynamic Spring*
[<https://www.youtube.com/watch?v=FFDvDWJ304A&list=PL90CW-sgygUao9Vkk04fFlxU9hEnf6msq&index=3&t=323s>]
- [21] Dipòsit Examens UPC. Examen TMM 10 abr 2015
[<https://examens.upc.edu/curs/240141/752>]
- [22] Cardona, S. y Clos, D. *Teoría de Máquinas* (Primera Edición en Castellano). Ediciones UPC. Barcelona. 2001. pp. 252.

11. Anexos: planos para la fabricación por carpintería





Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.